

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo Fin de Carrera

ESTUDIO DE MODELOS DE DISPERSIÓN Y SU
APLICACIÓN AL CONTROL INDUSTRIAL

Autor: Germán Villar Lagos

Tutor: D. Luciano Boquete Vázquez

Año 2017

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE MODELOS DE DISPERSIÓN Y SU
APLICACIÓN AL CONTROL INDUSTRIAL**

Autor: GERMÁN VILLAR LAGOS

Director: D. LUCIANO BOQUETE VÁZQUEZ

TRIBUNAL:

Presidente: D. ALEJANDRO MARTÍNEZ ARRIBAS

Vocal 1º: D. FELIPE ESPINOSA ZAPATA

Vocal 2º: D. LUCIANO BOQUETE VÁZQUEZ

FECHA:.....

AGRADECIMIENTOS

Quisiera mencionar y agradecer en este punto a algunas personas que considero muy importantes en la realización del presente trabajo.

A mi esposa Cristina por su apoyo constante y enorme generosidad, facilitando siempre la disponibilidad del tiempo requerido para elaborar el trabajo y junto con mis hijos Germán y Úrsula por su infinita paciencia.

A Luciano Boquete Vázquez, director del proyecto, por sus sabios consejos, indicaciones y correcciones que han sido de claves para llevar el trabajo a buen término.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE.....	6
TABLA DE FIGURAS	9
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
PALABRAS CLAVE.....	16
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	17
MEMORIA RESUMIDA	18
INTRODUCCIÓN	19
1 LA ATMÓSFERA.....	21
1.1 INTRODUCCIÓN.....	21
1.2 VISIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA	21
1.2.1 La troposfera.....	23
1.2.1.1 El viento	23
1.2.1.2 La lluvia.....	24
1.2.2 La Estratosfera.....	26
1.2.3 La Mesosfera.....	26
1.2.4 La Exosfera	27
1.3 ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA	27
1.4 DIFUSIÓN DE GASES EN LA ATMÓSFERA E INVERSIÓN TÉRMICA	29
1.5 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	30
1.6 INSTRUMENTACIÓN METEOROLÓGICA	32
1.6.1 Dirección y velocidad del viento	32
1.6.2 Pluviometría.....	35
1.6.3 Temperatura.....	36
1.6.4 Radiación solar	36
1.6.5 Presión atmosférica.....	37
1.6.6 Humedad ambiental	38
1.6.7 Emisión de partículas.....	38
1.6.8 Emisión de gases.....	40
1.6.9 Volumen / Caudal de emisión.....	40
1.7 DEFINICIONES METEOROLÓGICAS O ATMOSFÉRICAS.....	41
1.7.1 Relación o razón de Bowen.....	41
1.7.2 El Albedo.....	41
1.7.3 Longitud de Monin-Obukhov.....	42
1.7.4 Gradiente adiabático.....	43
1.7.5 Convección atmosférica	44
2 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE DISPERSIÓN.....	46
2.1 INTRODUCCIÓN.....	46
2.2 MODELOS DE CAJA	46

2.3	MODELOS GAUSSIANOS.....	48
2.4	MODELOS LAGRANGIANOS.....	49
2.5	MODELOS EULERIANOS.....	50
2.6	MODELOS DE GAS DENSO	51
2.7	CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE DISPERSIÓN ATENDIENDO A SU NATURALEZA.....	52
3	PRINCIPALES MODELOS DE DISPERSIÓN.....	53
3.1	ADMS.....	53
3.2	AERMOD	54
3.3	ATSTEP.....	54
3.4	CALPUFF.....	57
3.5	CMAQ	57
3.6	DISPERSION21	58
3.7	FLACS.....	60
3.8	FLEXPART	61
3.9	HYSPLIT.....	61
3.10	HYPACT	62
3.11	ISC3.....	64
3.12	NAME	67
3.13	MERCURE	68
3.14	OSPM	71
3.15	FLUIDYN-PANACHE.....	73
3.16	RIMPUFF	75
3.17	SAFE AIR.....	76
3.18	PUFF-PLUME.....	78
3.19	LILLPELLO	79
3.20	PUMA.....	79
4	MODELO DE DISPERSIÓN AERMOD.....	81
4.1	MODELO AERMOD.....	82
4.2	PRE-PROCESADOR AERMET	84
4.2.1	<i>Fichero de datos de superficie (*.SFC).....</i>	<i>85</i>
4.2.2	<i>Fichero de datos de perfil (*.PFL).....</i>	<i>87</i>
4.2.3	<i>Formato de fichero datos superficie (*.sfc).....</i>	<i>87</i>
4.2.4	<i>Formato de fichero de perfil (*.pfl).....</i>	<i>88</i>
4.2.5	<i>Ejemplo de fichero de datos de superficie (*.SFC)</i>	<i>88</i>
4.2.6	<i>Ejemplo de fichero de perfil (*.PFL)</i>	<i>89</i>
4.3	PRE-PROCESADOR AERSURFACE.....	89
4.3.1	<i>Ejemplo de fichero de salida de AERSURFACE.....</i>	<i>91</i>
4.4	PRE-PROCESADOR AERMAP	92
4.5	PRE-PROCESADOR BPIP-PRIME.....	93
4.5.1	<i>Elevación del penacho.....</i>	<i>94</i>
4.5.2	<i>Coeficientes de dispersión.....</i>	<i>95</i>
4.5.3	<i>Concentraciones cercanas y lejanas de la estela.</i>	<i>95</i>
4.6	MODELO AERSCREEN.....	98
4.7	PREPROCESADOR MAKEMET	99
5	AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL.....	100
5.1	INTRODUCCIÓN.....	100
5.2	CAPA 0: SENSORES Y ACTUADORES	103

5.3	CAPA 1: CONTROL DE BAJO NIVEL.....	104
5.4	CAPA 2: CONTROL PRINCIPAL.....	106
5.5	CAPA 3: MONITORIZACIÓN, MANDO Y CONTROL	107
5.6	CAPA 4: CONTROL AVANZADO O CONTROL DE ALTO NIVEL.....	110
5.7	CAPA 5: SISTEMAS CENTRALES.....	112
6	INTEGRACIÓN DE MODELOS DE DISPERSIÓN EN SISTEMAS DE CONTROL DE PLANTA.....	115
6.1	ANÁLISIS PRELIMINAR	115
6.2	APLICACIÓN GENÉRICA DE UN MODELO DE DISPERSIÓN	118
6.3	ANÁLISIS DE INTEGRACIÓN EN EL MODELO DE CONTROL DE PLANTA.	122
6.4	ESCENARIOS DE APLICACIÓN	125
6.5	TECNOLOGÍAS M2M, IoT Y CLOUD	126
6.6	SMARTCITIES O CIUDADES INTELIGENTES.....	129
6.7	PAQUETES Y PROGRAMAS COMERCIALES.....	135
6.7.1	<i>Lakes Environmental Software</i>	135
6.7.2	<i>ARIA Technologies</i>	136
6.7.3	<i>Canarina Software Ambiental</i>	137
6.7.4	<i>Providence Engineering and Environmental Group LLC</i>	138
6.7.5	<i>Gexcon AS</i>	139
6.8	MARCO LEGISLATIVO Y LEGISLACIÓN APLICABLE	141
6.9	EJEMPLO DE EJECUCIÓN DE MODELO	144
7	CONCLUSIONES.....	152
	BIBLIOGRAFÍA	153

TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1: Diagrama de capas de la atmósfera.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1-2 Escala Fujita de clasificación del viento según su velocidad.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1-3 Corte vertical de un frente cálido, con zona de riesgo de lluvia egeante.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 1-4 Tipo de copos según las condiciones de humedad y temperatura.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 1-5 Clases de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford según las condiciones y momento día/noche.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 1-6 Clases de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford según las condiciones de velocidad del viento, radiación y nubosidad.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 1-7 Esquema de temperaturas de la troposfera en situación normal</i>	<i>29</i>
<i>Figura 1-8 Esquema de temperaturas de la troposfera en situación de inversión térmica.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 1-9 Formas de penacho en escenarios según perfil de temperatura y momento del día.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 1-10 Tabla resumen de instrumentación meteorológica.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 1-11 Rosa de los vientos y diagrama de frecuencias de viento.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 1-12 Ejemplos de anemoveletas con interface de integración electrónica.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1-13 Pluviómetro con interface electrónica.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 1-14 Medidor de temperatura y humedad de exteriores con interface electrónica.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 1-15 Piranómetro con interface electrónica.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1-16 Barómetro con interface electrónica.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1-17 Higrómetro con interface electrónica combinado con sensor de temperatura.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1-18 Tabla de categorías de partículas según su tamaño y efectos sobre el ser humano.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 1-19 Opacímetros con interface electrónica.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 1-20 Analizadores y medidores de gases con interface electrónica</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1-21 Caudalímetros con interface electrónica.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1-22 Diagrama de recepción y emisión emitida (reflejada)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 1-23 Ecuación y diagrama de longitud de Monin-Obukhov.....</i>	<i>43</i>

<i>Figura 1-24 Relación entre gradiente adiabático seco y gradiente adiabático húmedo</i>	44
<i>Figura 1-25 Diagrama convección atmosférica</i>	45
<i>Figura 2-1 Diagrama del modelo de dispersión de caja y sus variables principales.</i>	47
<i>Figura 2-2 Diagrama del modelo de dispersión de caja de una fuente elevada.</i>	47
<i>Figura 2-3 Diagrama de emisión de fuente elevada y penacho Gaussiano.</i>	48
<i>Figura 2-4 Diagrama de “partículas” de un modelo de dispersión Lagrangiano en 3D.</i>	49
<i>Figura 2-5 Diagrama de dispersión de “partículas” comparado con dispersión de penacho</i>	50
<i>Figura 2-6 Diagrama de “celdas” de un modelo Euleriano.</i>	50
<i>Figura 2-7 Diagrama de salida de un gas denso de una chimenea</i>	51
<i>Figura 2-8 Diagrama y foto de una fuente de gas denso con penacho vertical</i>	51
<i>Figura 2-9 Clasificación de los modelos de dispersión por su naturaleza</i>	52
<i>Figura 3-1 Características del modelo de dispersión ADMS</i>	53
<i>Figura 3-2 Diagrama de bloques del modelo de dispersión AERMOD y sus procesadores</i>	54
<i>Figura 3-3 Diagrama de ubicación de ATSTEP dentro de la plataforma RODOS</i>	56
<i>Figura 3-4 Diagrama de flujo de datos y pre-procesadores para ATSTEP y otros modelos de la plataforma RODOS</i>	56
<i>Figura 3-5 Programa comercial de simulación basado en CALPUFF</i>	57
<i>Figura 3-6 Diagrama de bloques de la parte de transporte químico del modelo CMAQ</i>	58
<i>Figura 3-7 Simulación de cálculo de NOx con un programa basado en DISPERSION21</i>	59
<i>Figura 3-8 Ejemplos de aplicación del modelo FLACS</i>	60
<i>Figura 3-9 La figura muestra simulaciones con FLEXPART de una fuente de emisión</i>	61
<i>Figura 3-10 Página principal de la web del modelo HYSPLIT de la Universidad de Huelva</i>	62
<i>Figura 3-11 Estructura de datos y pre-procesadores del modelo HYPACT</i>	64
<i>Figura 3-12 Resultados 3D de simulación con HYPACT de dispersión de partículas en un complejo de edificios</i>	64
<i>Figura 3-13 Ejemplos de simulaciones con el modelo de dispersión ISC3 a corto plazo y a largo plazo</i>	66
<i>Figura 3-14 Simulación de modelo ISC3 a corto plazo (ISC3ST)</i>	66

<i>Figura 3-15 Simulación de modelo ISC3 a largo plazo (ISC3LT)</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3-16 Simulación con NAME de la emisión de una central nuclear después 5 horas</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3-17 Secuencias de una simulación con el paquete ARIA Risk</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3-18 Estructura del modelo OSPM.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3-19 Concepto operacional de la contaminación de calle</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3-20 Ejemplos de simulación con el modelo FLUIDYN-PANACHE.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3-21 Ejemplo de simulación con RIMPUP de accidente nuclear Fukushima .</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3-22 Simulaciones de una emisión de dióxido de azufre con SAFE AIR.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3-23 Simulación de transporte realizada con el modelo PUFF-PLUME.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3-24 Simulaciones de emisión de gas realizada con modelo LILLPELLO.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3-25 Simulaciones comparativas de modelo PUMA y datos de referencia de INERIS</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4-1 Diagrama de bloques del modelo AERMOD y pre-procesadores.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4-2 Diagrama de penacho y ecuación de advección – difusión.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4-3 Diagrama de flujo de procesamiento de datos previos a ejecución AERMOD</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4-4 Diagrama de ubicación de AERMET en el proceso de AERMOD.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4-5 Diagrama de bloques de proceso AERMET.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4-6 Cálculo de parámetros de superficie con AERSURFACE a partir de ficheros con formato NLCD92</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4-7 Diagrama de ubicación de AERMAP en el proceso de AERMOD.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4-8 Ejemplo de ejecución del pre-procesador AERMAP.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4-9 Diagrama de la estela detrás de un edificio.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4-10 Esquema de identificación de un nuevo edificio para PRIME</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4-11 Esquema de cómo configurar un edificio y chimenea para ejecutar un caso de prueba</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4-12 Diagrama de la estructura de influencia de un edificio según la dirección del viento.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5-1 Esquema de automatización en seis capas</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5-2 Diagrama general de automatización</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5-3 Diagrama de control de planta desde el punto de vista de seguridad</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5-4 Esquema de automatización en cuatro capas.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5-5 Esquema de automatización en tres capas</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5-6 Tabla resumen de interfaces eléctricas/electrónicas de sensores</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5-7 Diagrama de adaptación de interfaces de sensores</i>	<i>104</i>

<i>Figura 5-8 Capa de control de bajo nivel y elementos que lo componen.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5-9 Capa de control de bajo nivel.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5-10 Diagrama de buses de campo.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5-11 Diagrama de capas mostrando la capa de control principal o proceso</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5-12 Esquema general de un sistema SCADA</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5-13 Diagramas de sistema SCADA y su integración con las capas inferiores</i> <i>.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5-14 Ejemplo de interface de usuario de sistema SCADA.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5-15 Diagrama de implantación de un Sistema MES.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5-16 Diagramas de estructuras con capa MES.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5-17 Ubicación de la capa MES en un esquema de 4 capas según el standard</i> <i>ISA95.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5-18 Diagramas de plataforma central basada en SAP</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5-19 Diagrama de plataforma central basada en ORACLE.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 6-1 Diagramas de análisis preliminar de decisión de aplicación de modelos de</i> <i>dispersión en planta</i>	<i>116</i>
<i>Figura 6-2 Diagrama de aplicación de un modelo de dispersión.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 6-3 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 6 capas..</i>	<i>120</i>
<i>Figura 6-4 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 4 capas..</i>	<i>120</i>
<i>Figura 6-5 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 3 capas..</i>	<i>121</i>
<i>Figura 6-6 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema</i> <i>SCADA (solo monitorización).....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 6-7 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema</i> <i>SCADA (con integración de mando y control).....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 6-8 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema</i> <i>SCADA (con integración de mando y control y captación directa).....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 6-9 Diagrama de bloques de un ejemplo de escenario M2M presentado por un</i> <i>fabricante de semiconductores.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6-10 Diagrama de bloques de la arquitectura IoT</i>	<i>127</i>
<i>Figura 6-11 Diagrama de elementos involucrados en cloud computing y sus capas</i>	<i>128</i>
<i>Figura 6-12 Cadena de proceso de datos incluyendo “Data Mining” para la</i> <i>extracción del conocimiento</i>	<i>128</i>
<i>Figura 6-13 Ejemplo de arquitectura de Data Warehouse</i>	<i>129</i>
<i>Figura 6-14 Comité Técnico de Normalización (CTN) 178 Ciudades Inteligentes... </i>	<i>130</i>
<i>Figura 6-15 Estructura de subcomités del Comité Técnico de Normalización 178..</i>	<i>130</i>
<i>Figura 6-16 Subcomité 4 (SC4) del CTN 178 y su plan de proyectos de norma.....</i>	<i>131</i>

<i>Figura 6-17 Relaciones internacionales del CTN 178</i>	<i>131</i>
<i>Figura 6-18 Sistema CALIOPE de información de calidad del aire</i>	<i>133</i>
<i>Figura 6-19 Página web de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI)</i>	<i>134</i>
<i>Figura 6-20 Mapa de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI).....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 6-21 Página web de Lakes Environmental Software</i>	<i>136</i>
<i>Figura 6-22 Página web de ARIA Technologies.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 6-23 Página web de Canarina Software Ambiental.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 6-24 Página web de la división Oris-Solutions</i>	<i>139</i>
<i>Figura 6-25 Página web de Gexcon presentando software FLACS</i>	<i>140</i>
<i>Figura 6-26 Mapa de la Red Pública de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Castilla-La Mancha.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6-27 Datos registrados por la estación de Guadalajara el 16/06/2017</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6-28 Ubicación de la fuente supuesta utilizada en la simulación.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6-29 Configuración de datos meteorológicos y opciones de salida</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6-30 Configuración de datos de la fuente y opciones avanzadas</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6-31 Resultados gráficos de la simulación y visualización de resultados sobre cartografía</i>	<i>151</i>

RESUMEN

El presente trabajo aborda el análisis de los modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera y su posible aplicabilidad en el control industrial particularmente de plantas industriales.

En la primera parte se presenta una visión general sobre la atmósfera y una panorámica de los modelos de dispersión y terminología de los principales modelos y sus aplicaciones.

En la segunda parte, se presenta el control industrial de planta industriales y se analiza la integración de los modelos de dispersión en el control industrial.

El análisis se focaliza en la implantación del modelo AERMOD y en el contexto tecnológico actual de IoT, M2M, SmartCities, legislación, etc.

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of dispersion models of pollutants in atmosphere, and their potential application in industrial control used in industrial plants.

The first part of paper, presents a general view of atmosphere and a panoramic view of dispersion models and the terminology of main models and their applications.

In the second part, presents the industrial control of industrial plant and discusses the integration of dispersion models in industrial control.

The analysis focuses on the implementation of the AERMOD model with the technology “state of art” of IoT, M2M, Smartcities, laws, etc.

PALABRAS CLAVE

1. MODELOS DE DISPERSIÓN / DISPERSION MODELS
2. AERMOD, ISC3, EPA, EEA, CIEMAT, AEMET
3. CIUDADES INTELIGENTES / SMARTCITIES
4. CALIDAD DEL AIRE / AIR QUALITY
5. CONTROL INDUSTRIAL - PLANTA / INDUSTRIAL - PLANT CONTROL

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AEMET: agencia española de meteorología.

AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.

API: Application Programming interface.

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.

EEA: European Environment Agency.

EPA: Environmental Protection Agency.

IAEA: International Atomic Energy Agency.

JCCM: Junta de Comunidades de Castilla la Mancha.

MAPAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

NASA: national aeronautics and space administration

MEMORIA RESUMIDA

El presente trabajo aborda el análisis de los modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera y su posible integración y aplicabilidad en el entorno del control industrial utilizado en el control de plantas industriales.

En la primera parte de este trabajo, se da una visión general sobre la atmósfera y una panorámica de los modelos de dispersión, así como estudio general de los principales y más conocidos modelos y sus aplicaciones.

En la segunda parte, se presenta el marco de control industrial de plantas industriales y se analiza más en profundidad la implementación e integración de los modelos de dispersión en el entorno del control industrial.

Particularmente el análisis se focaliza en la implantación del modelo AERMOD, el modelo de uso preferente y recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA (Environmental Protection Agency) y también de uso extendido a nivel mundial.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la inquietud y curiosidad del autor acerca de la posibilidad del uso ventajoso de los modelos de dispersión en los sistemas de control industrial. Tradicionalmente los modelos de dispersión se han venido utilizando en la industria para realizar análisis o estudios puntuales, tales como estudios de calidad del aire, estudios de impacto ambiental y estudios de viabilidad de determinados proyectos, pero sin llegar a integrarse como un elemento del sistema de control de planta.

El incremento de la legislación y restricciones medioambientales a nivel mundial, pero especialmente en Europa, parece evidenciar la necesidad de disponer de mecanismos adicionales y complementarios a los sistemas de control industrial que permitan de manera rápida, y a ser posible automática, la toma de decisiones que garanticen el total cumplimiento de la normativa. En particular los modelos de dispersión, unido a la disponibilidad de equipos de altas prestaciones de cálculo a precios asequibles, permiten disponer de datos objetivos anticipados de los efectos de las emisiones de partículas y gases. Por lo que su uso permitirá a industrias con emisiones a la atmósfera disponer de un poderoso elemento de control.

Aunque las fuentes de emisión de contaminantes son muy numerosas y variadas, en el presente trabajo nos centraremos en las emisiones desde fuentes puntuales (chimeneas o focos de emisión localizados) por ser éstas las más habituales en la industria. Para otras fuentes tales como vehículos, viviendas, etc. existen también en la actualidad modelos matemáticos que se mencionan pero no serán objeto de estudio en el presente trabajo.

Con el fin de poner en contexto el estudio de la integración de los modelos de dispersión en los sistemas de control de planta, se realiza también una introducción a los principales elementos de los sistemas de control de una planta industrial y otros sistemas de planta o de la organización involucrados o integrados con los sistemas de control de planta.

En el capítulo “1 La atmósfera”, se presenta una descripción de la atmósfera con especial énfasis en las características y variables que afectan directamente a la dispersión de contaminantes desde focos fijos, así como de la instrumentación relativa a la medición de parámetros atmosféricos con especial énfasis en la medición y monitorización continua.

En el capítulo “2 Introducción a los modelos de dispersión”, se presenta la estructura interna de los modelos de dispersión, su clasificación y las principales características comunes a los mismos.

En capítulo “3 Principales modelos de dispersión”, se presentan los modelos de dispersión más conocidos y habituales a nivel mundial, para a continuación en el capítulo “4 Modelo de dispersión AERMOD”, describir en detalle modelo AERMOD por su especial importancia y aceptación.

En el capítulo “5 Automatización y control industrial”, se muestra una panorámica general de la automatización y el control industrial con el objetivo de situar el contexto del trabajo y enfocar la integración con el uso de modelos de dispersión.

En el capítulo “6 Integración de modelos de dispersión en sistemas de control de planta”, se presentan propuestas de integración de los modelos de dispersión en el sistema de control de planta.

En el capítulo “7 Conclusiones”, se exponen comentarios y conclusiones del trabajo así como comentarios acerca de la evolución futura que se vislumbra desde la referencia actual.

1 LA ATMÓSFERA

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo presentamos una visión general sobre la atmósfera, la terminología y la instrumentación aplicable para su medición y registro.

Las variables atmosféricas, su dinámica y medida resultan fundamentales en el estudio de la dispersión de contaminantes y muy particularmente en el uso de modelos de dispersión.

Las medidas de variables meteorológicas conjuntamente con las características del punto de emisión y su entorno constituyen las variables principales de entrada de un sistema de control y monitorización de emisiones. Por ello en este capítulo revisaremos los conceptos fundamentales de la atmósfera relacionados con este tipo de sistemas.

1.2 VISIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

Según la Real Academia de la Lengua se define atmósfera como “la capa de aire que rodea la tierra”. Si bien esta definición general es correcta, para adentrarnos en el estudio profundizaremos en cómo esta capa de aire se estructura a su vez en diferentes capas y su comportamiento dinámico.

La atmósfera comprende franjas que rodean la tierra hasta una altura variable de unos 250 a 1000 kilómetros, estructurada en las siguientes capas principales: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera.

La *Figura 1-1* adjunta, muestra las capas de la atmósfera indicando referencias de altura y temperaturas.

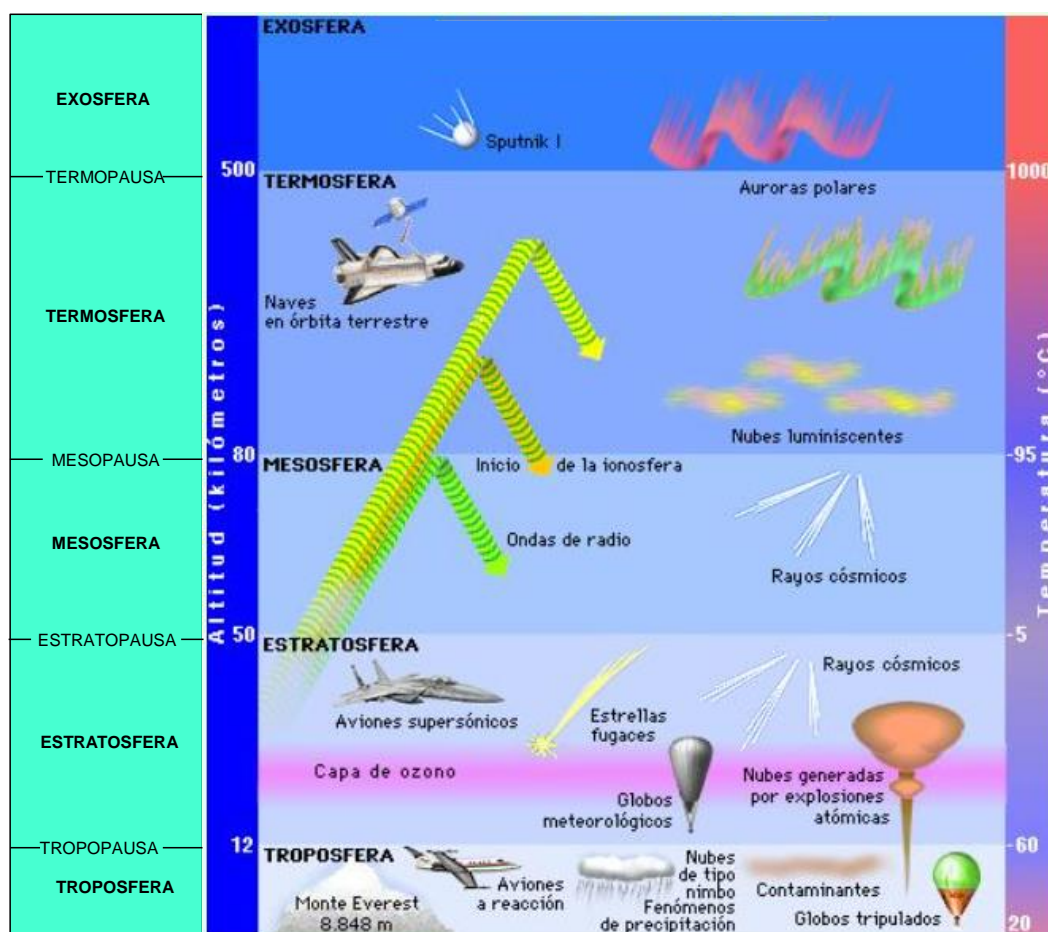


Figura 1-1: Diagrama de capas de la atmósfera. [1]

- **Troposfera:** es la capa de la atmósfera más cercana a la tierra y hasta una altura media de unos 11 kilómetros (8 Km. en los polos y 18 Km. en el ecuador), y en ella tienen lugar la mayoría de los fenómenos meteorológicos. Es la capa de interés para nuestro estudio dado que sus variables determinan principalmente los mecanismos de dispersión de contaminantes. Las zonas más bajas de la troposfera se calientan por reflexión del calor sobre la superficie terrestre, esa es la razón por la cual la temperatura disminuye al alejarse de la superficie terrestre (altura). El descenso de la temperatura se estima en media de 6 a 6.5 °C por cada kilómetro de altitud, alcanzándose en su límite superior, denominado tropopausa, una temperatura de aproximadamente -56 °C.
- **Estratosfera:** Se extiende desde la tropopausa hasta aproximadamente unos 55 Km. de altitud. En la estratosfera se encuentra la capa de ozono el cual desempeña un importante papel protector ya que absorbe parte de las radiaciones ultravioleta (UV) procedentes del sol de longitud de onda de 0.2 a 0.3 micras. La mayor concentración de ozono se sitúa entre los 20 y 25 Km. de altitud y recibe el nombre de ozonósfera. Debido a la presencia de ozono, la temperatura aumenta con la altitud de forma que en el límite superior, denominado estratopausa, las temperaturas son similares a las de la superficie terrestre.

- Mesosfera:** Se extiende desde la estratopausa hasta una altitud aproximada de unos 80 Km. En la mesosfera la concentración de ozono disminuye, por lo que su capacidad de absorción de la radiación UV es muy pequeña. En el límite superior, denominado mesopausa, se alcanzan temperaturas de hasta -100°C.
- Termosfera:** Está por encima de la mesopausa y su límite superior, denominado termopausa, aumenta durante el día pudiendo llegar hasta unos 500 Km. y disminuye durante la noche. Hasta esta zona se extiende la ionosfera y se produce el fenómeno de las auroras que se observa en latitudes polares causado por el choque de partículas cargadas procedentes del sol contra el campo magnético de la Tierra.
- Exosfera:** Es la región atmosférica más distante de la superficie terrestre, contiene una cantidad de gases muy reducida y no tiene un límite superior definido. Se estima que la zona indefinida límite entre la atmósfera terrestre y el espacio exterior se encontraría entorno a los 1000 Km. de altitud.

1.2.1 La troposfera

Como mencionábamos al principio del capítulo, la troposfera es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre en la que se producen la mayoría de los fenómenos meteorológicos y es también la zona de interés para nuestro estudio ya que será la que determine principalmente la dispersión de contaminantes.

La troposfera contiene alrededor del 80% de toda la masa de gases de la atmósfera y el 99% de todo el vapor de agua. En general, la temperatura de la troposfera decrece con la altitud a razón de 5 a 6,5 °C por Km.

En la troposfera, los intercambios de calor se producen por turbulencia y por el viento, y los intercambios de agua por evaporación y precipitación. La intensidad de los vientos crece con la altura, y las nubes más altas alcanzan una altitud de 10 Km.

1.2.1.1 El viento

Según el Instituto Nacional de Meteorología se define el viento como el aire en movimiento. Su importancia es enorme, ya que es un regulador de las distintas temperaturas debidas a la diferente radiación solar que llega a la superficie terrestre y por supuesto de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera.

Desde el punto de vista de este trabajo el viento constituye una variable fundamental en la determinación de la dispersión de contaminantes y su velocidad y dirección serán por ello una de las principales variables de entrada de los modelos de dispersión.

El movimiento del aire es debido a la diferencia de presión que existe en los distintos puntos de la atmósfera. El viento se desplaza de las zonas de altas presiones (anticiclones) a las zonas de bajas presiones (borrascas).

Las principales magnitudes que caracterizan el viento son velocidad y su dirección. El viento de alta velocidad llega a ser muy destructivo provocando grandes catástrofes. En la *Figura 1-2* adjunta, se muestran una clasificación del viento en función de su velocidad.

Intensidad	RACHAS (km/h)	Ejemplo de destrucción
EFO	105-137	
EF1	138-178	
EF2	179-218	
EF3	219-266	
EF4	267-322	
EF5	>322	

Escala Fujita Realzada. Fuente: NWS.

Figura 1-2 Escala Fujita de clasificación del viento según su velocidad. [1]

1.2.1.2 La lluvia

La lluvia es un fenómeno atmosférico que consiste en la precipitación de partículas líquidas de agua de diámetro mayor de 0,5 mm producidas por la condensación del vapor de agua que contienen las nubes y depende de tres factores: la presión, la temperatura y la radiación solar.

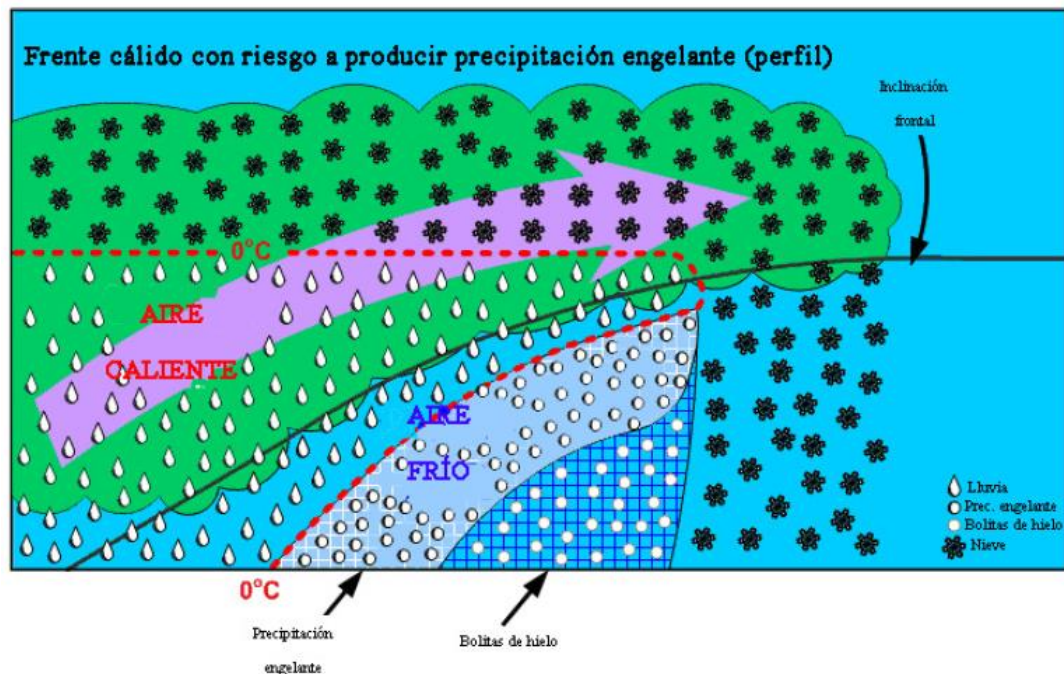


Figura 1-3 Corte vertical de un frente cálido, con zona de riesgo de lluvia egeante. [1], [2]

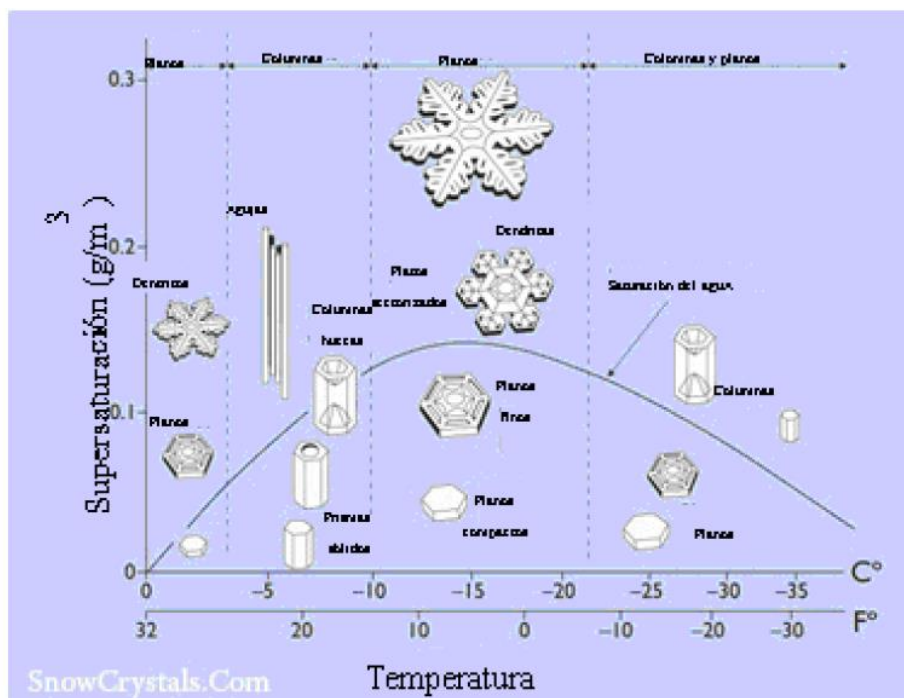


Figura 1-4 Tipo de copos según las condiciones de humedad y temperatura. [1], [3]

1.2.2 La Estratosfera

La estratosfera comienza a una altitud entre los 10 km y los 19 km y que se extiende 50 km. En su parte inferior, la temperatura permanece casi invariable con la altitud, pero a medida que se asciende aumenta muy deprisa porque el ozono absorbe la luz solar. La estratosfera carece casi por completo de nubes u otras formaciones meteorológicas.

Los límites de la estratosfera son la tropopausa que es la denominación del límite por la parte inferior con la troposfera y la estratopausa que es la denominación del límite por la parte superior con la mesosfera.

La temperatura de la estratosfera aumenta con la altura, debido a que la estratosfera contiene altas concentraciones de gas ozono (O_3) que absorbe luz ultravioleta (UV) procedente del Sol y la convierte en calor. Esta absorción previene que la luz ultravioleta llegue a la superficie de la Tierra.

Se mueve muy poco aire entre la Troposfera y la Estratosfera por lo que la estratosfera casi no contiene agua. Esto quiere decir que las nubes de la estratosfera sólo se forman si hace tanto frío que la pequeña cantidad de agua existente se condensa y forma cristales de hielo.

Los compuestos químicos que tienen una vida atmosférica muy larga son los únicos que pueden alcanzar la estratosfera. Sin embargo, una vez en la estratosfera pueden permanecer ahí durante mucho tiempo (por ejemplo el material emitido por grandes erupciones volcánicas han permanecido en la estratosfera durante casi dos años). Esta característica es de interés en la dispersión de algunos contaminantes si alcanzan esta capa de la atmósfera.

1.2.3 La Mesosfera

La mesosfera (de las palabras griegas Mesos = medio y Sphaira = bola) es la capa de la atmósfera de la Tierra que está directamente encima de la estratosfera y directamente debajo de la termosfera.

El límite superior de la mesosfera es la mesopausa, que puede ser el lugar más frío de origen natural en la Tierra. Los límites exactos superior e inferior de la mesosfera varían con la latitud y con la temporada, pero el límite inferior de la mesosfera normalmente se encuentra a una altura de unos 50 km sobre la superficie de la Tierra y la mesopausa es por lo general cerca de 100 km, excepto en las latitudes medias y altas en verano, donde desciende hasta una altura de unos 85 km. En la mesosfera, la temperatura disminuye con la altitud. Esto se debe a la disminución de la calefacción solar y el aumento del enfriamiento por emisión de radiación de CO_2 . La parte superior de la mesosfera, llamado mesopausa, es el lugar más frío en la Tierra. Las principales características dinámicas en esta región son fuertes vientos zonales (de este a oeste), las mareas atmosféricas, las ondas de gravedad atmosféricas internas (comúnmente llamadas “ondas de gravedad”) y las ondas planetarias.

La mayoría de estas mareas y las olas están también en la troposfera y la estratosfera inferior, y se propagan hacia arriba hasta la mesosfera. En la mesosfera, la amplitud de las ondas de gravedad puede llegar a ser tan grande que las olas se vuelven inestables y se disipan.

Las nubes noctilucientes o nuctilucientes que brillan en la oscuridad de la noche se encuentran en la mesosfera. Se trata de un fenómeno producido por nubes de polvo o cristales de hielo que se encuentran a gran altura, entre unos 80 y 100 km, de forma que durante determinados momentos de la noche presentan cierta iluminación por el sol y adquieren un color plateado. La ionización es tan débil que cuando cae la noche, y la fuente de ionización es removida, los electrones libres vuelven a ser de nuevo una molécula neutra. Esto solo ocurre en la alta mesosfera

1.2.4 La Exosfera

La exosfera es la capa superior de la atmósfera terrestre. En la exosfera, una molécula puede viajar hacia arriba moviéndose lo suficientemente rápido para alcanzar la velocidad de escape, si se mueve por debajo de la velocidad de escape se le impedirá escapar del cuerpo celeste por la gravedad. Todo debido a la baja densidad de la exosfera.

La exosfera es la última capa antes del espacio exterior. Dado que no existe una frontera clara entre el espacio exterior y la exosfera, la exosfera es a veces considerada una parte del espacio ultraterrestre.

Los principales gases dentro de la exosfera son los gases más ligeros:

- Hidrógeno.
- Helio (en cantidad reducida).
- Dióxido de carbono
- Oxígeno atómico.

La altitud de su límite inferior, conocida como la termopausa o exobase, oscila entre 250 a 500 kilómetros dependiendo de la actividad solar.

El límite superior de la exosfera puede ser definido teóricamente por la altitud de aproximadamente 190.000 kilómetros; la mitad de la distancia a la Luna.

Esto es debido a que como mencionamos anteriormente, la zona de transición entre la atmósfera de la Tierra y el espacio interplanetario es la misma exosfera.

1.3 ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

La dispersión de contaminantes está en gran parte determinada por el comportamiento de la capa más baja de la atmósfera. En 1961 el físico inglés Frank Pasquill categorizó una clasificación de la estabilidad atmosférica compuesta de seis clases nombradas con las letras de la A la F, siendo A la de mayor turbulencia y F la más estable o con menores turbulencias.

La Figura 1-5 y la Figura 1-6 adjunta presentan la definición de las seis clases de estabilidad presentadas por Pasquill-Gifford según las condiciones y el momento día/noche y según las condiciones y velocidad del viento, radiación solar y nubosidad, respectivamente.

Día	- Clase A: Condiciones extremadamente inestables. - Clase B: Condiciones moderadamente inestables. - Clase C: Condiciones ligeramente inestables.
Día y Noche	- Clase D: Condiciones neutras de estabilidad. - Clase E: Condiciones ligeramente estables.
Noche	- Clase F: Condiciones estables.

Figura 1-5 Clases de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford según las condiciones y momento día/noche. [1], [4], [5]

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Día			Noche (2)	
	Radiación solar incidente (1)			4/8 ≤ Nubosidad ≤ 7/8	Nubosidad ≤ 3/8
	Fuerte mayor que 50 cal/cm ² h	Moderada entre 25 y 50 cal/cm ² h	Débil Menor que 25 cal/cm ² h		
< 2	A	A – B	B	F	F
2-3	A - B	B	C	E	F
3-5	B	B – C	C	D	E
5-6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Figura 1-6 Clases de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford según las condiciones de velocidad del viento, radiación y nubosidad. [1], [4], [5]

Nota 1: Las unidades de radiación solar se expresan en cal/cm² (Langley) o en kWh/m², donde 1 cal/cm² = 0,0116 kWh/m².

Nota 2: La noche se define como el período desde una hora después de la puesta del sol, hasta una hora antes de la salida del mismo.

Nota 3: La nubosidad se mide en octavos, lo cual significa:

0/8 ----- Cielo despejado.

4/8----- La mitad del cielo cubierto.

8/8----- Cielo totalmente cubierto.

Según se observa en la tabla, las siguientes conclusiones aplican a las clases de estabilidad:

- La radiación solar incrementa la inestabilidad atmosférica, debido a que el calentamiento de la superficie de la tierra hace fluir hacia arriba el aire caliente y bajar el aire frío lo que provoca un proceso de mezclado vertical.

- Las noches claras hacen que las condiciones evolucionen hacia estable debido a que la superficie enfría más rápidamente estableciendo condiciones más estables e inversiones.
- El viento incrementa el mezclado vertical, rompiendo cualquier tipo de estratificación y provocando que las condiciones evolucionen hacia la clase neutra.

1.4 DIFUSIÓN DE GASES EN LA ATMÓSFERA E INVERSIÓN TÉRMICA

En circunstancias normales en la troposfera, como ya hemos mencionado anteriormente, la temperatura del aire desciende con la altura encontrándonos con aire más caliente a nivel del suelo (como consecuencia de la reflexión de la radiación solar) y más frío en las zonas más elevadas, tal como puede observarse en la *Figura 1-7* adjunta.

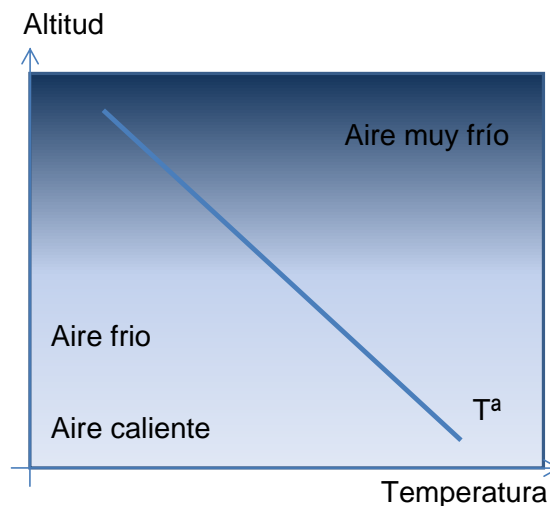


Figura 1-7 Esquema de temperaturas de la troposfera en situación normal. [6]

Sin embargo en ocasiones esta situación se ve alterada por la presencia de una capa de aire cálido a cierta altura que provoca que la temperatura ascienda con la altura en esa franja, tal como se muestra en la *Figura 1-8* adjunta.

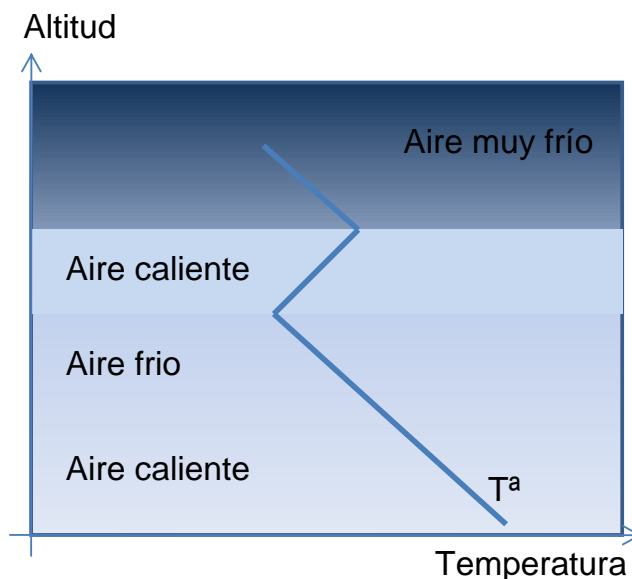


Figura 1-8 Esquema de temperaturas de la troposfera en situación de inversión térmica. [6]

1.5 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

La dispersión atmosférica de contaminantes depende de las condiciones meteorológicas y de los parámetros y condiciones en que se produce la emisión del contaminante en la fuente, es decir de la ubicación de la fuente, altura de la misma, velocidad de salida y temperatura de los gases o partículas.

Por supuesto existe una variada casuística de emisiones no previsibles debida a accidentes en instalaciones, incendios o fenómenos naturales tales como erupciones volcánicas que provocan emisiones de contaminantes a la atmósfera que están fuera de los escenarios de control industrial de planta. En estos escenarios también son de aplicación los modelos de dispersión pero no desde un enfoque de regulación sino desde un enfoque de análisis de la situación y evolución futura (estudios de impacto, informes de afectación, etc.). Este tipo de aplicaciones de los modelos de dispersión se mencionan en el trabajo puntualmente y únicamente a efectos ilustrativos.

Para evitar o minorar los efectos perjudiciales de las emisiones permanentes, se impone la regulación y el control de las emisiones de determinados contaminantes, bien mediante restricciones al uso de sustancias concretas, bien mediante la regulación de las actividades potencialmente contaminadoras. Estas actividades se suelen agrupar por sectores, tales como la producción de energía, sector industrial, transporte, gestión de residuos, actividades agrarias (ganadería, uso de fertilizantes, cultivos), sin olvidar actividades domésticas (tales como uso de pinturas o aerosoles en espacios abiertos).

Desde el punto de vista de la fuente, su altura de emisión, las condiciones meteorológicas en el punto de emisión y las características del terreno y elementos cercanos (edificios, colinas, etc.) condicionan la evolución del penacho y la forma que presenta.

La Figura 1-9 adjunta muestra las diferentes formas que adquiere el penacho en función del perfil de temperatura y el momento del día.

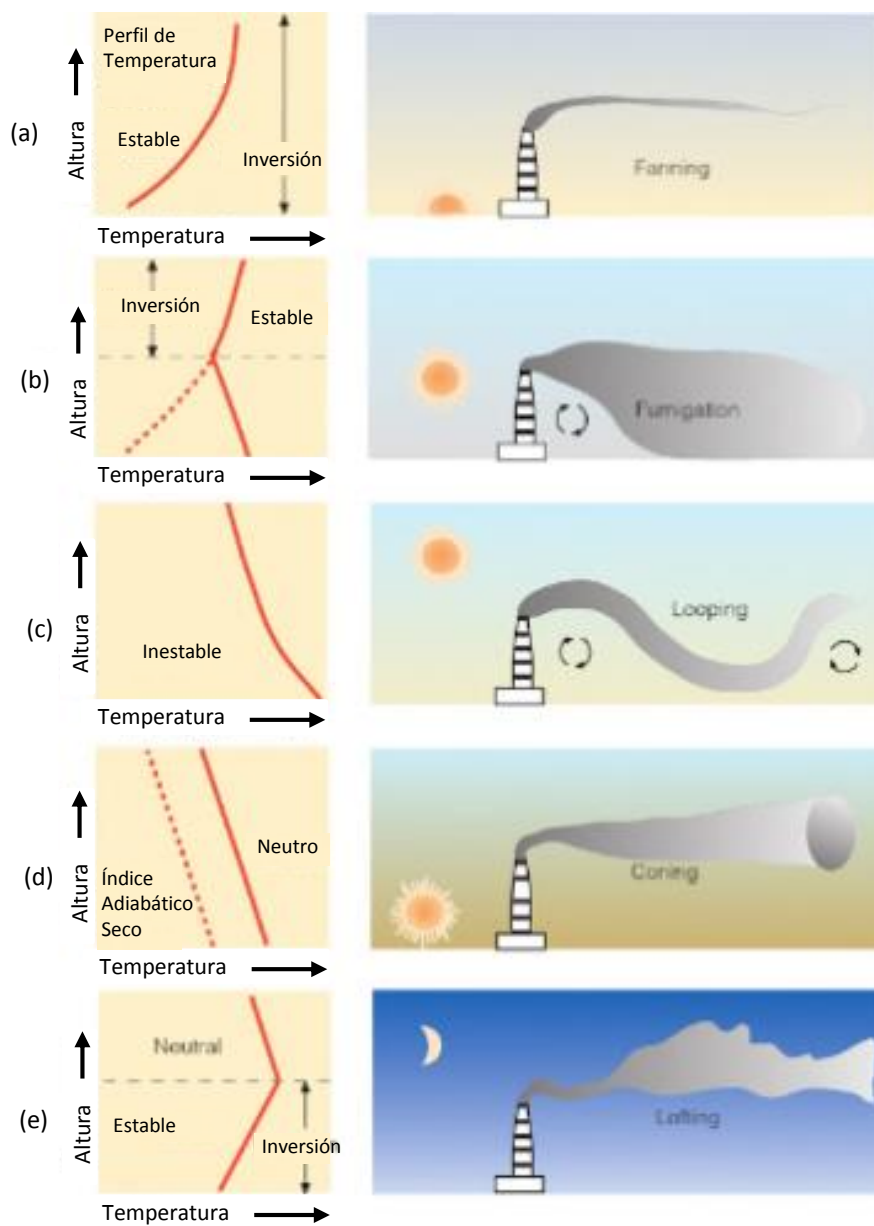


Figura 1-9 Formas de penacho en escenarios según perfil de temperatura y momento del día. [7], [8]

1.6 INSTRUMENTACIÓN METEOROLÓGICA

En este apartado, introduciremos la principal instrumentación utilizada en la medición de parámetros meteorológicos. Para los fines del uso expuesto en el presente trabajo, el control industrial, los instrumentos deben estar dotados de capacidad de integración electrónica con el fin de que su lectura, configuración y comando se integren en el sistema de control industrial. Sin embargo las nuevas tecnologías posibilitan también obtener datos de instrumentación meteorológica a través de la infraestructura IT del entorno e incluso adquirir datos elaborados, filtrados para reducir la carga de proceso en las simulaciones o en caso de necesidad de análisis puntuales.

La *Figura 1-10* muestra la tabla que resume las principales magnitudes de la atmósfera y la instrumentación utilizada para su medida.

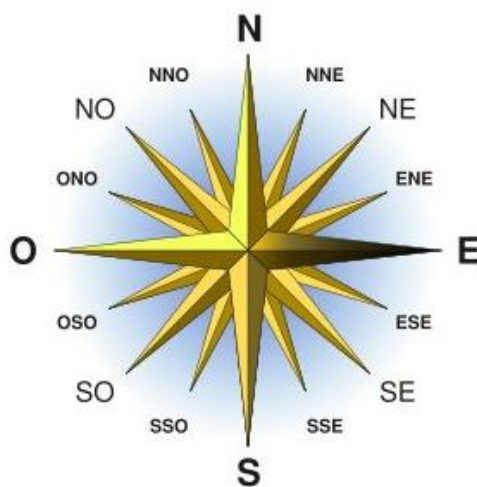
MAGNITUD	INSTRUMENTACION
Dirección y velocidad del viento.	Veleta, anemómetro y anemoveleta.
Pluviometría.	Pluviómetro.
Temperatura.	Termómetro.
Radiación solar.	Piranómetro.
Presión atmosférica.	Barómetro.
Humedad ambiental.	Higrómetro.
Emisión de partículas.	Opacómetro.
Emisión de gases.	Analizador de gases.
Volumen / Caudal de emisión.	Caudalímetro.

Figura 1-10 Tabla resumen de instrumentación meteorológica. [6]

1.6.1 Dirección y velocidad del viento

La dirección del viento se mide con la veleta y la velocidad con el anemómetro o con un instrumento que combina ambos y que se denomina anemoveleta.

El anemómetro más usado es el de cazoletas, que consiste en una cruz o molinete horizontal móvil alrededor de un eje vertical; cada brazo de la cruz lleva en su extremo una cazoleta cónica o semiesfera hueca, estando todos los huecos dirigidos en el mismo sentido. En estas condiciones el viento encuentra siempre una cazoleta por su cara cóncava y la opuesta por la convexa; como la primera opone mucha mayor resistencia que la segunda, el aparato se pone a



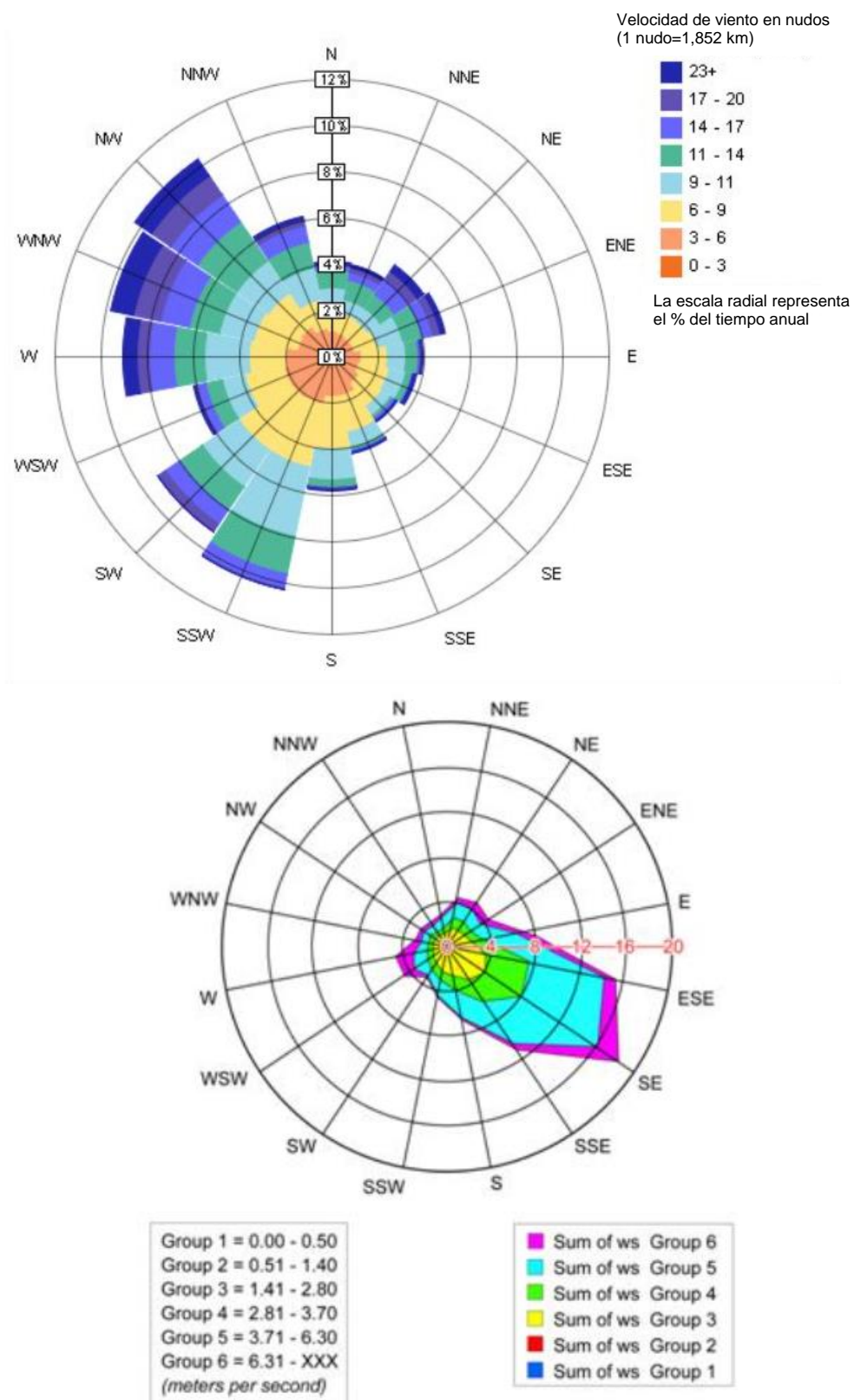


Figura 1-11 Rosa de los vientos y diagrama de frecuencias de viento. [9]

En la *Figura 1-12* adjunta se muestran ejemplos de anemoveletas provistas de interface electrónica.

ANEMOVELETA YOUNG 05103

MODELO 05103 Rango: 0-100 m/s 0- 360°



Figura 1-12 Ejemplos de anemoveletas con interface de integración electrónica. [10], [11]

1.6.2 Pluviometría

La cantidad de lluvia se mide con el pluviómetro, el cual básicamente se compone de un recipiente que recoge la lluvia caída a través de una apertura de área conocida. Con el fin de automatizar su lectura y evitar el vaciado manual se han diseñado sistemas de cazoletas autovolcantes que giran y se vacían al llenarse con una determinada cantidad de agua y que permite medir la cantidad de lluvia caída detectando los giros del eje. Otra implementación se basa en la medida de la cantidad de agua que pasa a través de detectores de gota o detectores de flujo en tubo de conducción.



Figura 1-13 Pluviómetro con interface electrónica. [12]

1.6.3 Temperatura

La temperatura se mide con el termómetro y se dispone en el mercado de una gran variedad de termómetros con interface electrónica y diferentes sensibilidades. En la *Figura 1-14* adjunta se muestra un medidor de temperatura y humedad con interface electrónica y con varias sondas para instalación en exteriores.



Figura 1-14 Medidor de temperatura y humedad de exteriores con interface electrónica. [13]

1.6.4 Radiación solar

La radiación solar se mide con el piranómetro también llamado solarímetro o actinómetro. Se trata de un instrumento que mide la densidad del flujo de radiación solar (W/m^2) en un campo de 180° .

Generalmente se utilizan tres medidas de radiación: semiesférica total, difusa y directa.

La *Figura 1-15* adjunta muestra un piranómetro con interface electrónica.



Figura 1-15 Piranómetro con interface electrónica. [14]

1.6.5 Presión atmosférica

La presión atmosférica se mide con el barómetro y representa la presión ejercida por la capa gaseosa que envuelve la tierra.

La presión atmosférica disminuye con la altura aunque no de forma lineal debido a la densidad (compresión) variable de los gases y su dinámica de movimiento.

La *Figura 1-16* adjunta muestra un barómetro dotado de interface electrónica para la integración.



Figura 1-16 Barómetro con interface electrónica. [13]

1.6.6 Humedad ambiental

Se denomina humedad ambiental a la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire la cual se puede expresar de forma absoluta, de forma relativa o grado de humedad. La humedad relativa expresa la relación entre la cantidad de vapor de agua que contienen el aire y la necesaria para alcanzar la saturación a la misma temperatura. El instrumento para medir la humedad ambiental se denomina higrómetro y la *Figura 1-17* muestra un modelo combinado con medidor de temperatura y dotado de interface electrónica.



Figura 1-17 Higrómetro con interface electrónica combinado con sensor de temperatura. [13]

1.6.7 Emisión de partículas

La emisión de partículas sólidas a la atmósfera se puede producir desde focos o fuentes puntuales, por ejemplo chimeneas, o desde focos o fuentes dispersas, por ejemplo desde un almacenamiento a cielo abierto de un material que contenga partículas pequeñas susceptibles de ser arrastradas en suspensión por el efecto del viento como la arena.

La medida directa de emisión de partículas se suele realizar en focos o fuentes puntuales mediante unos instrumentos denominados opacímetros. La medida de las emisiones de fuentes dispersas se suele realizar por recogida de partículas en puntos situados a cierta distancia (inmisiones).

La unidad de medida de las emisiones de partículas se expresa en términos del peso de las partículas por unidad de volumen (p.e. mg/m^3).

La emisión de partículas se suele categorizar en función de su diámetro aerodinámico que presenta en la dirección de desplazamiento en suspensión, como:

- PM10 (particulate matter 10 μm) que son las partículas con un diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros.
- PM2.5 (particulate matter 2.5 μm) que son las partículas con un diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrómetros.

- PM0.1 (particulate matter 0.1 μm) que son las partículas con un diámetro aerodinámico menor a 0,1 micrómetros.

La principal razón de esta categorización es que la distancia recorrida, el tiempo en suspensión y sus efectos son muy dependientes de su tamaño. La tabla adjunta resume estas características para las tres categorías.

Categoría	Tamaño	Distancia que recorren	Efectos sobre el ser humano
PM10	< 10 μm	1 a 10 Km.	Efectos nocivos en el sistema respiratorio de la personas.
PM2.5	< 2,5 μm	50 a 1000 Km.	Atraviesan los alveolos pulmonares, y quedan retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias superiores.
PM0.1	< 0,1 μm	Más de 1000 Km	Penetran en los pulmones y pueden alcanzar el torrente sanguíneo.

Figura 1-18 Tabla de categorías de partículas según su tamaño y efectos sobre el ser humano. [15], [8]

La composición de las partículas emitidas es principalmente polvo suspendido, polvo de carbón, ceniza, óxidos metálicos de Si Al, Ti, Fe, CaCO_3 , NaCl, polen, esporas, fragmentos de plantas/animales, basuras, etc.

La Figura 1-19 adjunta muestra varios medidores de emisiones de partículas u opacímetros (medidores de opacidad) equipados con interface de integración electrónica.



Figura 1-19 Opacímetros con interface electrónica. [16]

1.6.8 Emisión de gases

La medida de la emisión de gases en focos o fuentes puntuales, por ejemplo chimeneas, se suele realizar mediante analizadores o medidores del gas o gases de interés en el foco de emisión. Los gases más usuales son los óxidos de Azufre SO_x, los óxidos de Nitrógeno NO_x, dióxido de carbono CO₂ y monóxido de carbono CO.

La composición de las emisiones de gases es principalmente de SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, H⁺, C, compuestos orgánicos, metales (Pb, Cd, Zn, Mn, Fe) y partículas unidas al agua.

La *Figura 1-20* adjunta muestra varios medidores o analizadores de gases en línea que incorporan interface electrónica de integración.



Figura 1-20 Analizadores y medidores de gases con interface electrónica. [16]

1.6.9 Volumen / Caudal de emisión

Con el fin de establecer la cantidad de emisión ya sea de partículas o de gases, adicionalmente a la concentración será necesario disponer del caudal de emisión. La medida del caudal de emisión se realiza por medio de instrumentos denominados caudalímetros o bien por estimación directa conocidas las dimensiones del foco y el flujo de emisión.

La *Figura 1-21* adjunta muestra un caudalímetro equipado con interface electrónica.



Figura 1-21 Caudalímetros con interface electrónica. [16]

1.7 DEFINICIONES METEOROLÓGICAS O ATMOSFÉRICAS

En este apartado se incluyen algunas definiciones meteorológicas o atmosféricas que se mencionan o citan en el trabajo y que no son muy conocidas.

1.7.1 Relación o razón de Bowen

Para una superficie de agua, la relación o razón de Bowen es el cociente entre la pérdida de calor por conducción y turbulencia y la pérdida de calor debida a la evaporación.

$$B = Q_h / Q_e$$

Razón de Bowen = Flujo Calor Sensible/ Flujo calor latente

Esta relación fue enunciada por Ira Sprague Bowen (1898–1973), un astrofísico que teorizó sobre la evaporación en los cuerpos de agua.

Cuando la magnitud de B es menor que uno, una mayor proporción de la energía disponible en la superficie pasa a la atmósfera como calor latente, este es el caso de condiciones húmedas. Y por el contrario, si el valor de B es mayor que uno, una mayor proporción de energía pasa desde la superficie a la atmósfera como calor sensible, este el caso de condiciones secas.

Algunos ejemplos de valores de B son:

- En el mar: 0.1
- Prado: 0.5
- Desierto: 10.0

[1], [4]

1.7.2 El Albedo

El albedo es la relación existente entre la energía reflejada y la energía incidente en la longitud de onda de la luz visible.

El albedo depende de la inclinación de la irradiación incidente (cuando más se aproxima la inclinación a la perpendicular, más importante es la reflexión) y de la naturaleza de la superficie reflectante (por ejemplo un cuerpo claro refleja con mayor facilidad que otro oscuro).

Esta característica hace que los planetas (que no tienen luz propia) brillen, dado que reflejan una parte de la luz que reciben del Sol.

Un suelo cubierto de nieve tiene un albedo más elevado que una pradera o un bosque. La nieve posee un albedo medio de 0,7, mientras que el de un bosque verde es de 0,2. El albedo planetario se sitúa aproximadamente en 0,1 lo que significa que alrededor de un 30 % de la energía solar entrante parte de nuevo en forma de irradiación directa hacia el espacio. El albedo de los continentes es aproximadamente de un 34 %, mientras que el de los océanos es de un 26 % y el de las nubes de altitud media y baja se sitúa entre el 50 % y el 70%.

A escala planetaria el balance energético es igual a cero, sin embargo la situación de equilibrio no es habitual en la superficie terrestre. Algunas zonas reciben más energía de la que emiten y

otras al contrario emiten más de la que reciben. En general los balances son excedentarios hasta los paralelos comprendidos entre 35° - 40°. En estas latitudes se igualan, y por encima de 35° - 40° pasan a ser deficitarios. Las variaciones en la cantidad de energía recibida y emitida condicionan el calentamiento o enfriamiento del aire, factores que contribuyen en la distribución de los climas y en la circulación atmosférica.

La Figura 1-22 adjunta muestra un diagrama de recepción y emisión emitida (reflejada).

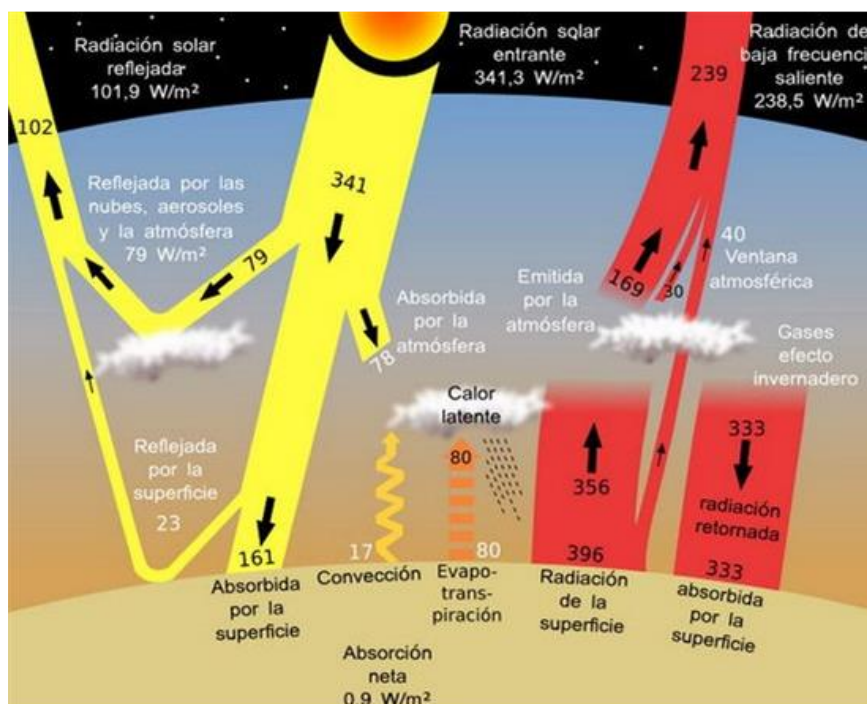


Figura 1-22 Diagrama de recepción y emisión emitida (reflejada). [17]

1.7.3 Longitud de Monin-Obukhov

La teoría de Semejanza desarrollada por Monin-Obukhov (1954), es una teoría basada en el análisis dimensional, asumiendo hipótesis como la homogeneidad horizontal, la isotropía y la cuasi estacionalidad en el flujo, lo cual permite simplificar el problema en algunos casos.

La hipótesis básica en la que se apoya dicha teoría es que en una capa de tensión constante, las características de la turbulencia y del flujo medio dependen únicamente de cuatro variables independientes: la altura sobre la superficie z , la velocidad de fricción u , el flujo de calor cinemático superficial Q_0 y el parámetro de flotabilidad g/T_0 , a partir de los cuales se puede formar un único grupo adimensional independiente:

$$\xi = \frac{z}{L}$$

Utilizado como parámetro de estabilidad, y siendo:

$$L = \frac{u_*^3}{k(g/T_0)Q_0}$$

La llamada longitud de Monin-Obukhov que junto con u^* constituyen los dos únicos parámetros de escala, siendo k la constante de Von-Karman.

Según esta teoría, cualquier característica media de la turbulencia en esta capa, f , normalizada por una escala adecuada f_0 , y definida a partir de estas cuatro variables independientes debe ser una función universal del parámetro z/L .

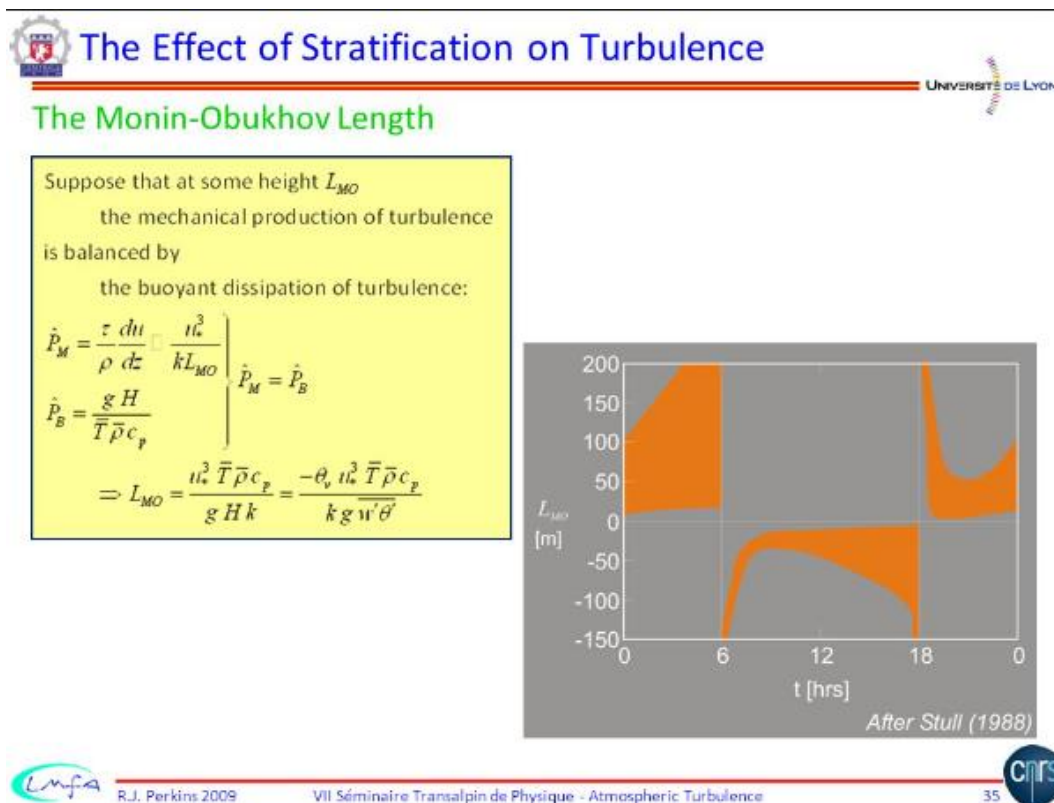


Figura 1-23 Ecuación y diagrama de longitud de Monin-Obukhov. [4], [18], [19]

1.7.4 Gradiente adiabático

El gradiente adiabático seco (GAS) es el descenso de temperatura que sufre una masa de aire al ascender sin que se llegue a producir condensación. Este descenso es del orden de 1°C por cada 100 m de elevación.

El gradiente adiabático húmedo (GAH) es el enfriamiento que sufre una masa de aire al ascender desde que comienza la condensación del vapor de agua que contiene. Es aproximadamente de $0,6^\circ\text{C}$ por cada 100 m de ascenso. Este valor es menor que el gradiente adiabático seco, ya que, durante el proceso de condensación, se libera el calor latente, que contrarresta el descenso de temperatura.

El gradiente adiabático seco se relaciona con la estabilidad atmosférica puesto que no hay condensación (formación de nubes), mientras que el gradiente adiabático húmedo se

relaciona con la inestabilidad puesto que sí hay condensación ya que la masa de aire al ascender su temperatura alcanza el punto de rocío momento en el que comienza la condensación. Si las gotitas se unen formando gotas mayores, su tamaño las vuelve incapaces de mantenerse en suspensión y se producirá la precipitación.

La *Figura 1-24* muestra una gráfica con la relación entre el gradiente adiabático seco y el gradiente adiabático húmedo.

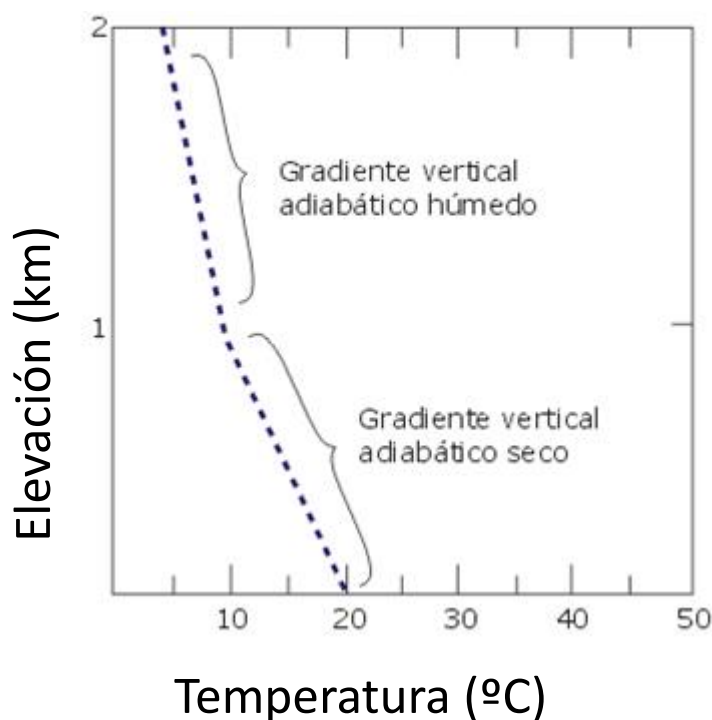


Figura 1-24 Relación entre gradiente adiabático seco y gradiente adiabático húmedo. [1]

1.7.5 Convección atmosférica

La convección es un mecanismo físico por el cual se transporta calor, humedad, etc., mediante el movimiento de la masa que compone un determinado fluido (agua o aire). Este tipo de transporte se produce en líquidos y gases debido a su capacidad de desplazarse libremente y de establecer en su seno corrientes que se denominan corrientes convectivas.

En meteorología, este mecanismo de intercambio de calor se denomina "convección atmosférica", y las parcelas de aire ascendentes reciben el nombre de "corrientes térmicas" o simplemente "térmicas".

La *Figura 1-25* adjunta muestra en un diagrama la dinámica de la convección atmosférica.

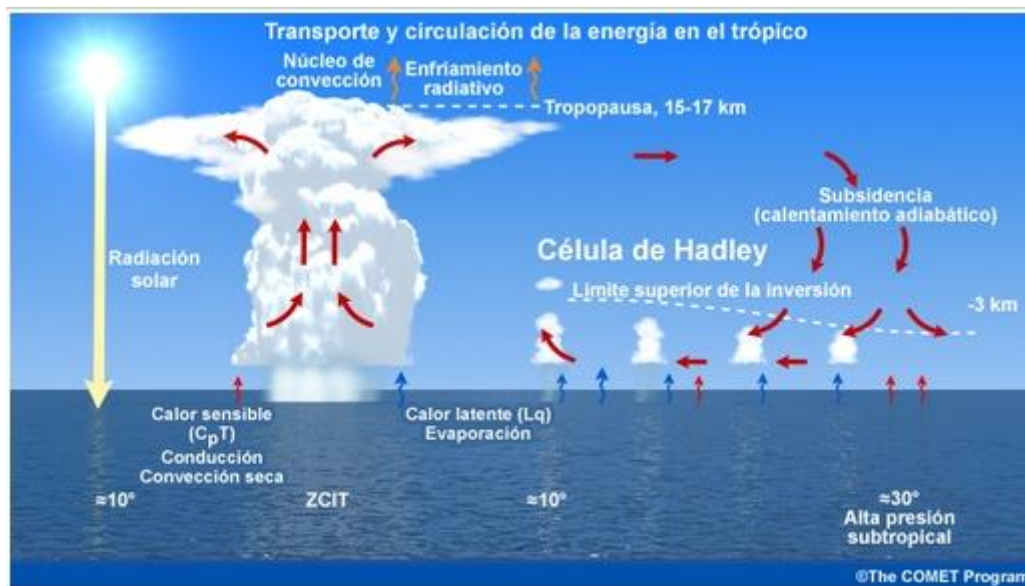


Figura 1-25 Diagrama convección atmosférica. [1], [20]

2 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE DISPERSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos de estimación de concentración de contaminantes, emitidos por una o más fuentes, son modelos matemáticos que permiten estimar las concentraciones de diversos contaminantes con una serie de restricciones o condiciones de cálculo y en función de las concentraciones de emisión de la fuente o fuentes, las condiciones meteorológicas y las características del terreno circundante a la fuente.

Los modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera se pueden clasificar en 5 tipos principales y también existen modelos híbridos que combinan modelos de 2 o más de los tipos principales:

- Modelos de caja.
- Modelos Gaussianos.
- Modelos Lagrangianos.
- Modelos Eulerianos.
- Modelos de gas pesado o de gas denso.

2.2 MODELOS DE CAJA

Los modelos de caja se basan en la emisión difusa de contaminantes desde un área determinada en un volumen, contemplando también la entrada y salida de contaminantes por arrastre de viento.

Asume que los contaminantes tienen una distribución homogénea dentro de la caja y utiliza esta asunción para calcular la concentración de contaminantes en cualquier lugar dentro de la región. Aunque útil este modelo es muy limitado en su capacidad de predecir la distorsión con precisión debido a que la asunción de que la distribución es homogénea es demasiado simple.

La Figura 2-1 adjunta muestra un diagrama del modelo de caja y la Figura 2-2 muestra un diagrama del modelo de caja para una fuente elevada.

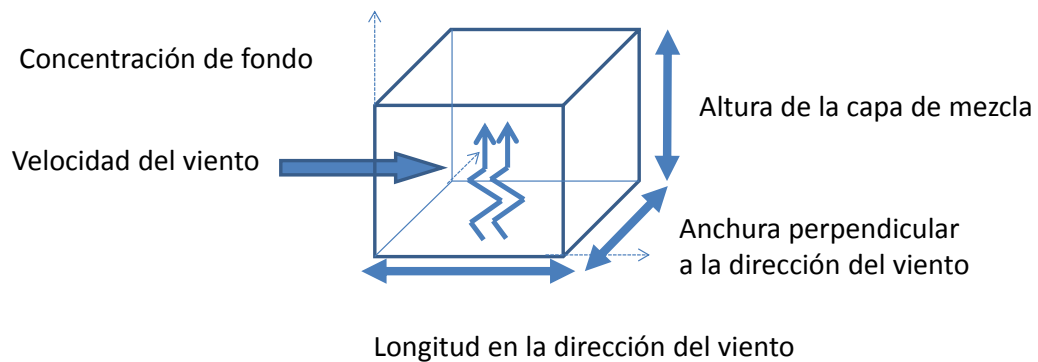


Figura 2-1 Diagrama del modelo de dispersión de caja y sus variables principales.

En este tipo de modelo se asume que la emisión ocupa todo el volumen de la caja correspondiente al área de la caja y la altura del volumen a favor del viento.

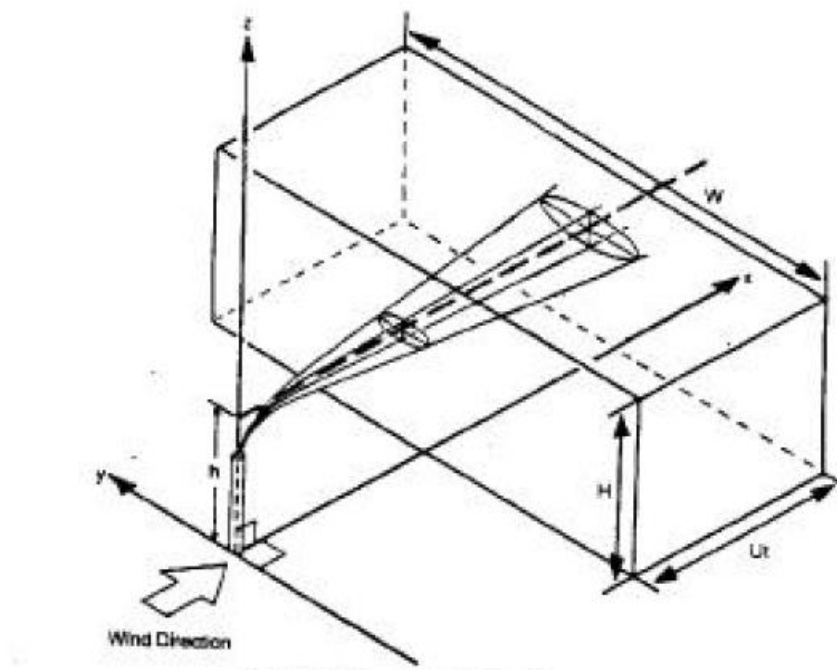


Figura 2-2 Diagrama del modelo de dispersión de caja de una fuente elevada. [5]

Su principal ventaja es su escasa complejidad matemática y su principal inconveniente es que se basa en hipótesis ideales que en muchos casos se alejan de la realidad. Posibles ejemplos de aplicación pueden ser el cálculo de contaminantes de una ciudad y las emisiones de vertidos homogéneos.

2.3 MODELOS GAUSSIANOS

El modelo de dispersión Gaussiano es el modelo más antiguo y probablemente también el tipo de modelo más usado. El modelo asume que la dispersión de contaminantes sigue una distribución Gaussiana. Los modelos Gaussianos son usados a menudo para predecir la dispersión de fuentes continuas, penachos ligeros de contaminación aérea originados a nivel del suelo o en fuentes elevadas.

Los modelos de dispersión de penacho se basan en hipótesis derivadas de la naturaleza estocástica de la turbulencia y la dispersión del contaminante, lo que permite que sean relativamente fáciles de programar en un sistema informático. Constituyen una solución de la ecuación Advección-Difusión en condiciones muy restrictivas. Asumen que la distribución del contaminante dentro la nube sigue una distribución de Gauss (campana de Gauss) en las dos direcciones (anchura y altura).

La *Figura 2-3* muestra un diagrama de emisión de fuente elevada de un penacho Gaussiano.

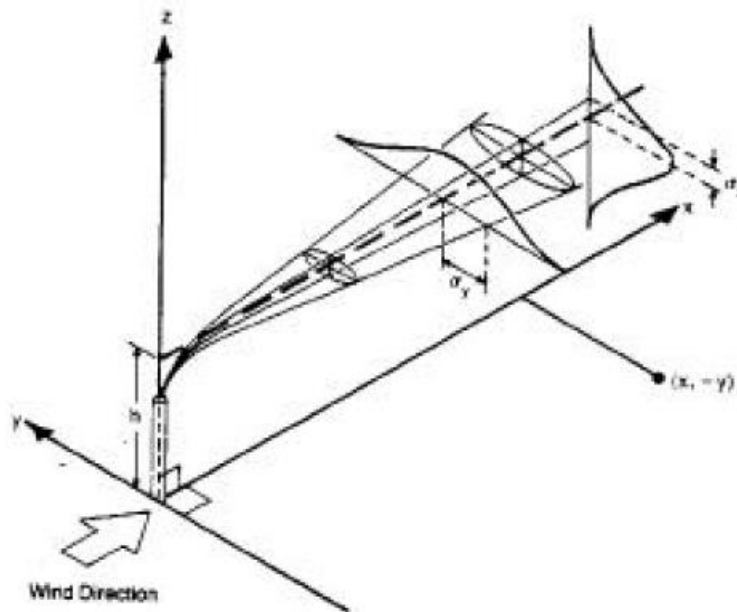


Figura 2-3 Diagrama de emisión de fuente elevada y penacho Gaussiano. [5]

El modelo de dispersión del contaminante viene dado por la fórmula siguiente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Donde,

$c(x,y,z)$ = Concentración de contaminante en una coordenada específica [ML^{-3}],
 x = distancia en la dirección del viento [L],
 y = distancia con el viento de costado [L],
 z = distancia vertical desde el suelo [L],

Q = flujo de emisión de contaminantes [MT^{-1}],
 σ_y = coeficiente de función de dispersión lateral [L],
 σ_z = coeficiente de función de dispersión vertical [L],
 u = velocidad del viento en la dirección del viento [$L T^{-1}$],
 H = altura efectiva de la chimenea o fuente de emisión [L].

El principal algoritmo utilizado en los modelos Gaussianos es la ecuación generalizada de dispersión para penachos puntuales continuos.

Los modelos Gaussianos también se utilizan para fuentes discontinuas también denominados de ráfagas o soplos (Puffs).

2.4 MODELOS LAGRANGIANOS

Los modelos de dispersión Lagrangianos matemáticamente siguen la contaminación de un penacho en parcelas o “partículas”, y como las parcelas o partículas se mueven por la atmósfera, modelando el movimiento de las partículas como un movimiento de trayectoria aleatoria. El modelo Lagrangiano calcula la dispersión de contaminantes en el aire calculando la estadística de las trayectorias de un gran número de partículas de penacho con el contaminante. El modelo Lagrangiano usa un marco móvil de referencia acorde con el movimiento de las partículas desde la ubicación inicial. Se diría que un observador del modelo Lagrangiano visualizaría el penacho como si lo siguiese siempre junto a él.

La Figura 2-4 muestra un diagrama en 3 dimensiones de un modelo de dispersión Lagrangiano y la Figura 2-5 muestra la dispersión basada en “partículas” en comparación con la dispersión de penacho.

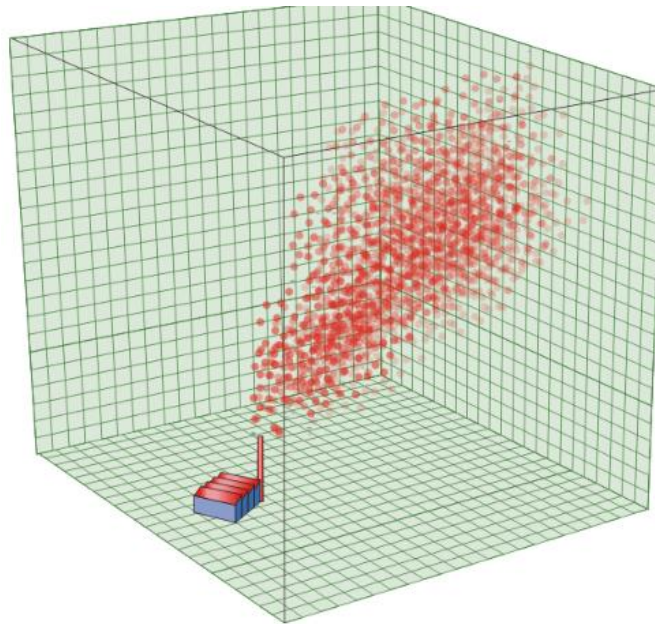


Figura 2-4 Diagrama de “partículas” de un modelo de dispersión Lagrangiano en 3D. [5], [21]

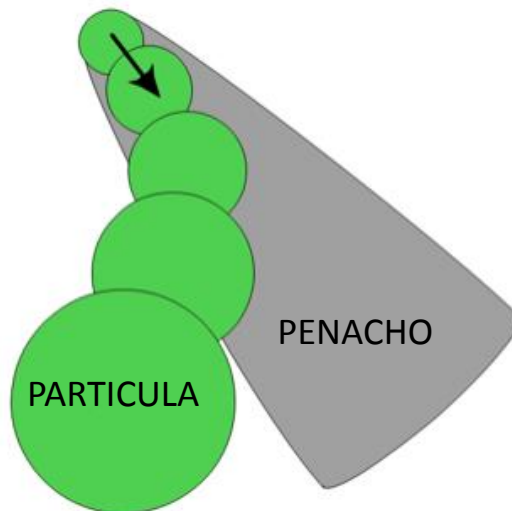


Figura 2-5 Diagrama de dispersión de “partículas” comparado con dispersión de penacho. [5], [21]

2.5 MODELOS EULERIANOS

El modelo de dispersión Euleriano es muy similar al modelo Lagrangiano en el sentido de que sigue el movimiento de un gran número de parcelas o partículas del penacho desde que se mueven de su posición inicial. La principal diferencia entre los dos tipos de modelos es que los modelos Eulerianos utilizan una referencia tridimensional cartesiana fija en lugar de una referencia móvil que usan los modelos Lagrangianos. Se diría que un observador de un modelo Euleriano vería como el penacho se aleja. La Figura 2-6 muestra un diagrama del modelo de “celdas” Euleriano.

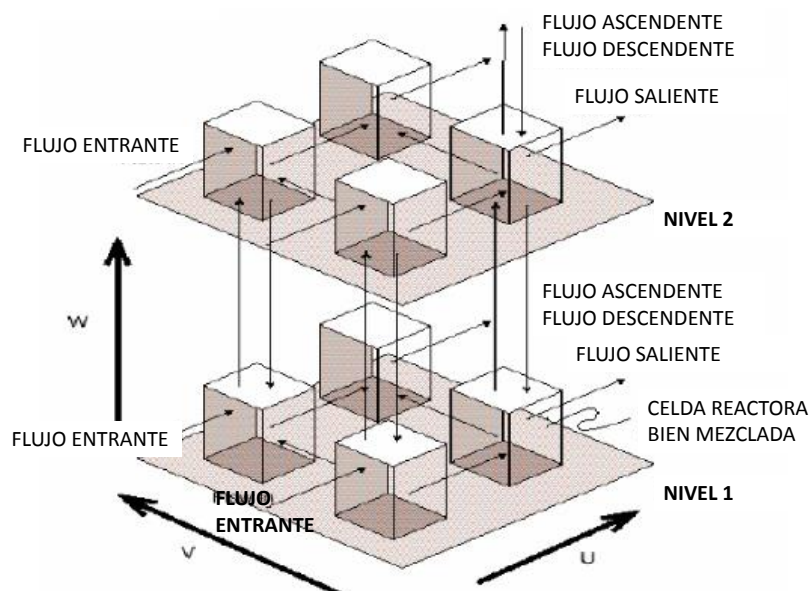


Figura 2-6 Diagrama de “celdas” de un modelo Euleriano. [21]

2.6 MODELOS DE GAS DENSO

Los modelos de dispersión de gas denso simulan la dispersión de penachos de contaminantes de gas denso (más pesado que el aire).

Los principales modelos de dispersión de gas denso son:

- modelos de dominio público DEGADIS SLAB
- modelos propietarios AIRTOX, CHARM, FOCUS, SAFEMODE y TRACE

La Figura 2-7 y la Figura 2-8 muestran el diagrama de salida de una emisión de gas denso de una chimenea y una emisión con penacho vertical respectivamente.

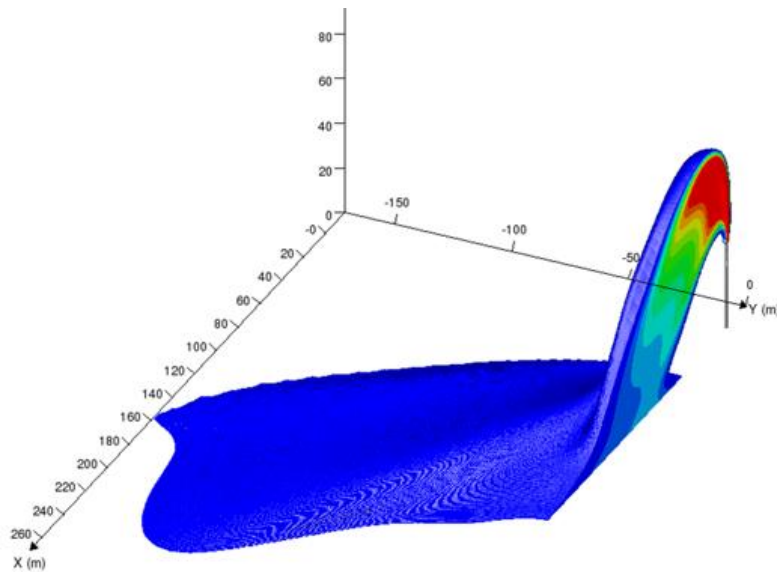


Figura 2-7 Diagrama de salida de un gas denso de una chimenea. [22]

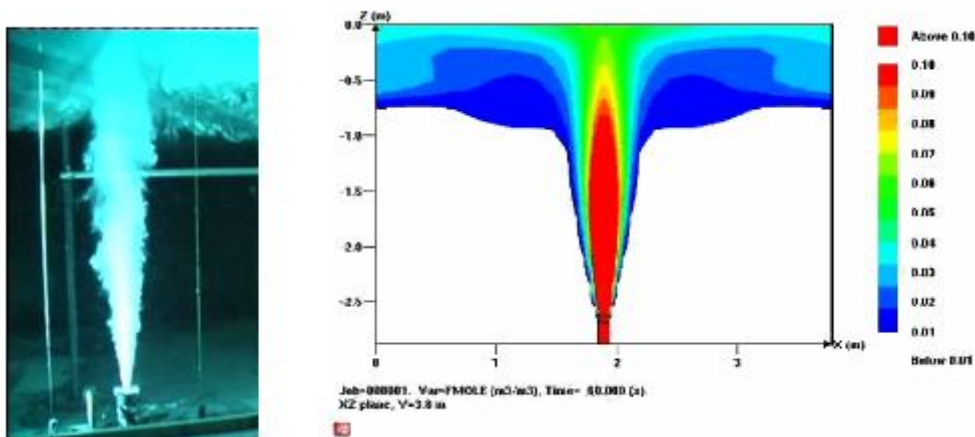


Figura 2-8 Diagrama y foto de una fuente de gas denso con penacho vertical. [22]

2.7 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE DISPERSIÓN ATENDIENDO A SU NATURALEZA

A continuación se muestra otra clasificación de los modelos de calidad de aire atendiendo a su naturaleza:

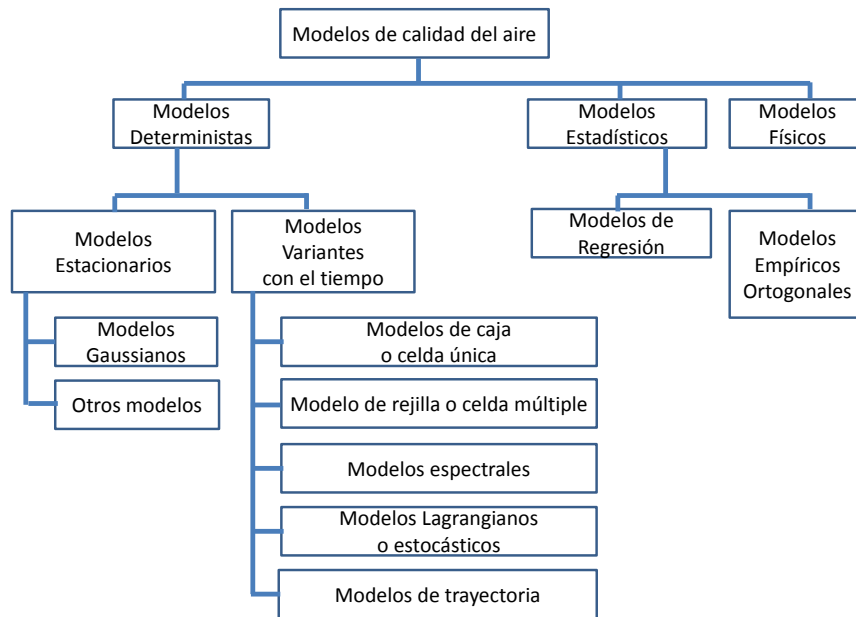


Figura 2-9 Clasificación de los modelos de dispersión por su naturaleza. [6]

Aunque el presente trabajo se centra en los modelos de dispersión y especialmente en los modelos de dispersión gaussianos que estudiaremos más en detalle, también se presentan modelos de otras categorías.

3 PRINCIPALES MODELOS DE DISPERSIÓN

En este capítulo se presentan los principales modelos de dispersión existentes registrados en las dos principales agencias medioambientales: la EPA (Environmental Protection Agency) americana y la EEA (European Environment Agency) europea.

El objetivo es ofrecer una panorámica amplia de los principales modelos en los principales países a nivel mundial.

3.1 ADMS

ADMS-3 (Atmospheric Dispersion Modeling System), es un modelo británico de la compañía CERC, incluido en la lista de modelos alternativos. Se trata de un modelo de dispersión avanzado para calcular concentraciones de contaminantes emitidos de forma continua desde focos puntuales, fuentes de línea (carreteras) y fuentes de área o tridimensionales. También puede usarse para emisiones discretas desde un foco puntual. Incluye algoritmos para tratar los principales efectos debidos a edificios, terreno complejo, depósito húmedo y seco, sedimentación gravitacional, fluctuaciones rápidas de concentración, reacciones químicas, decaimiento radiactivo y dosis gamma, sobre-elevación del penacho, emisiones en chorro, diversos rangos de promediado en tiempo para los resultados (desde minutos a un año), procesador meteorológico, etc.

La Figura 3-1 muestra un diagrama con las características principales de este modelo.

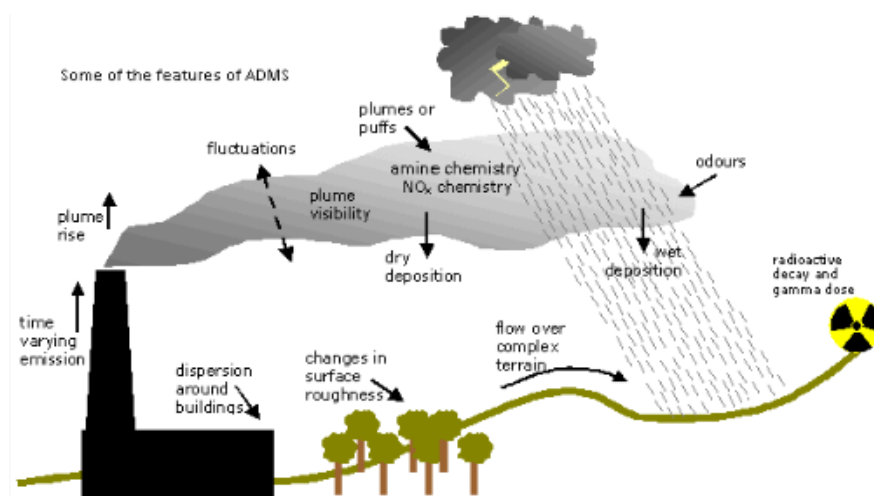


Figura 3-1 Características del modelo de dispersión ADMS. [4], [23]

3.2 AERMOD

AERMOD Modeling System, es un modelo de penacho en estado estacionario que incorpora la dispersión basada en la estructura y conceptos de escalado de la turbulencia en la capa límite planetaria, incluyendo el tratamiento de fuentes de área, de volumen y puntuales (chimeneas) y terrenos complejos y simples. Incorpora los algoritmos del modelo PRIME (Plume RIse Model Enhancements) para evaluar los efectos dinámicos de edificios en las inmediaciones de las fuentes.

Este modelo es recomendado por la EPA (Environmental Protection Agency) americana y por este motivo será objeto de estudio en detalle del capítulo siguiente.

La Figura 3-2 muestra un diagrama de bloques del modelo AERMOD y sus pre-procesadores.

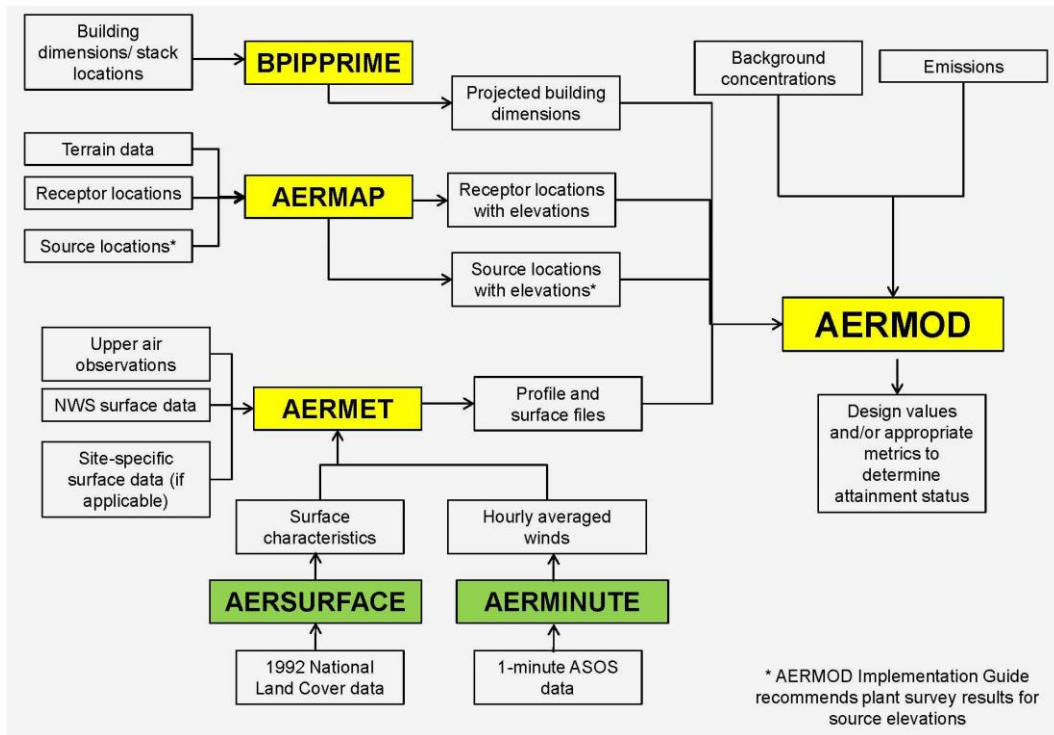


Figura 3-2 Diagrama de bloques del modelo de dispersión AERMOD y sus procesadores. [5], [4]

3.3 ATSTEP

ATSTEP es un modelo gaussiano de fuente emitiendo a pulsos (Puffs) para distancias hasta 50 km. Ha sido desarrollado para simulaciones rápidas especialmente en liberaciones accidentales aéreas de contaminantes radioactivos dentro de la plataforma

RODOS (Real-time On-line DecisiOn Support). ATSTEP puede calcular diagnósticos a 24 horas y en tiempo real de la situación radiológica durante o después de una liberación.

La situación radiológica se describe por los resultados calculados con ATSTEP:

- La concentración en el aire cercano al suelo (instantáneo e integrado en el tiempo).
- La contaminación de la superficie del suelo (seca y húmeda).
- La radiación gamma desde el suelo y desde la nube radioactiva.

Los resultados se presentan como dependientes del tiempo, campos específicos de nucleídos en la zona de cálculo en el entorno de la fuente de liberación.

Los siguientes fenómenos están considerados en el modelado de la dispersión atmosférica y la situación de radiación en ATSTEP:

- Meteorología dependiente del tiempo (datos meteorológicos SODAR).
- Datos de predicciones.
- Campos de vientos no homogéneos.
- Ratios de liberación nucleídos dependientes del tiempo.
- Energía térmica y subida de los soplos (puffs) liberados.
- Deposiciones secas y húmedas y deflexión correspondiente de la nube.
- Radiación gamma desde el suelo y desde la nube.
- Descomposición radioactiva y otras dosis potenciales.

A diferencia de los modelos clásicos de ráfagas (puffs) como RIMPUFF en ATSTEP son las ráfagas integradas y no las ráfagas instantáneas las que se consideran liberadas, similar a las secciones de una emisión en penacho de un modelo gaussiano segmentado.

A diferencia de un modelo de penacho segmentado en el modelo de ATSTEP el transporte se alcanza con dos trayectorias fijas en ambos extremos de la ráfaga. Este par de trayectorias sigue homogénea en una dimensión 2D variable con el viento paso a paso, y también la elongación de la ráfaga incluye todos los cambios en posición, forma y orientación como estrechamientos, rotaciones, contracciones y derivas laterales.

Dado que la elongación del penacho puede cubrirse con un número reducido de ráfagas, el número de pasos necesarios para una simulación de una liberación y el transporte es relativamente pequeño. La aproximación de la elongación del penacho reduce el tiempo de cálculo del modelo de forma que puede lograrse un pronóstico en menos de 10 minutos y un diagnóstico completo de la dispersión de contaminación en solo unas horas. En comparación con el modelo clásico de ráfagas el modelo de aproximación de penacho permite la reducción espacio temporal (el mínimo intervalo es de 10 minutos en el diagnóstico y 30 minutos en el pronóstico), y realmente solamente se requieren resoluciones mayores en situaciones extremas de condiciones de dispersión no homogéneas.

La *Figura 3-3* muestra un diagrama con la ubicación de ATSTEP dentro de la plataforma RODOS y la *Figura 3-4* muestra el diagrama de flujo de datos y pre-procesadores para ATSTEP y otros modelos de la plataforma RODOS.

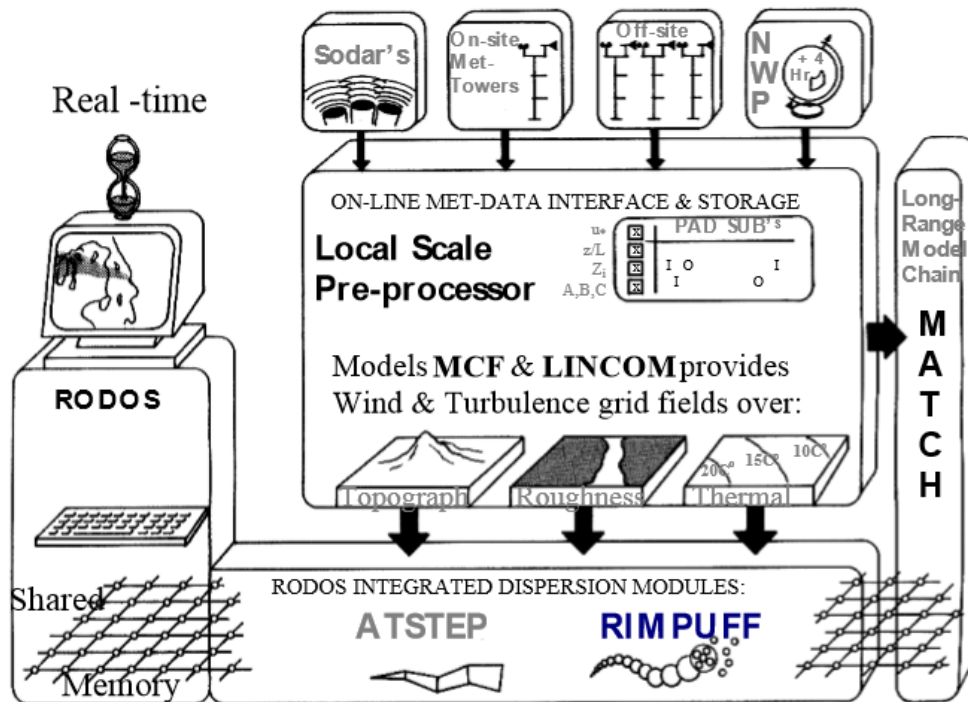


Figura 3-3 Diagrama de ubicación de ATSTEP dentro de la plataforma RODOS. [24], [5]

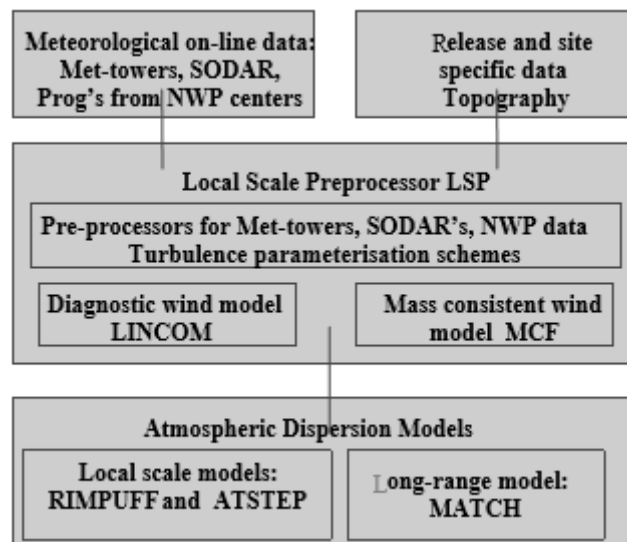


Figura 3-4 Diagrama de flujo de datos y pre-procesadores para ATSTEP y otros modelos de la plataforma RODOS. [24], [5]

3.4 CALPUFF

CALPUFF es un modelo Lagrangiano de nubes aisladas, que simula el efecto de las condiciones meteorológicas (simuladas con CALMET), variando en el tiempo y en el espacio sobre el transporte, transformación y eliminación del contaminantes. Puede aplicarse a escalas desde decenas a centenas de kilómetros e incluye algoritmos para tratar procesos a pequeña escala, así como efectos a gran escala.

CALPUFF es un modelo de dispersión multicapa, en régimen no estacionario y de ráfagas que puede simular los efectos temporales y espaciales teniendo en cuenta la variación de las condiciones meteorológicas del transporte de contaminantes, el descenso de contaminantes debido a procesos de deposición seca y húmeda así como la transformación de contaminantes debido a reacciones químicas.

Esta complejidad requiere un esfuerzo especialmente significativo en la creación del fichero de datos meteorológicos para CALPUFF. Una opción para reducir el obstáculo que puede suponer el fichero de datos meteorológicos requerido por CALPUFF es usar un fichero de datos meteorológicos de ISCT3 generado con un preprocesador como PCRAMMET.

La *Figura 3-5* muestra la portada de un folleto de presentación de un programa comercial de simulación basado en CALPUFF.

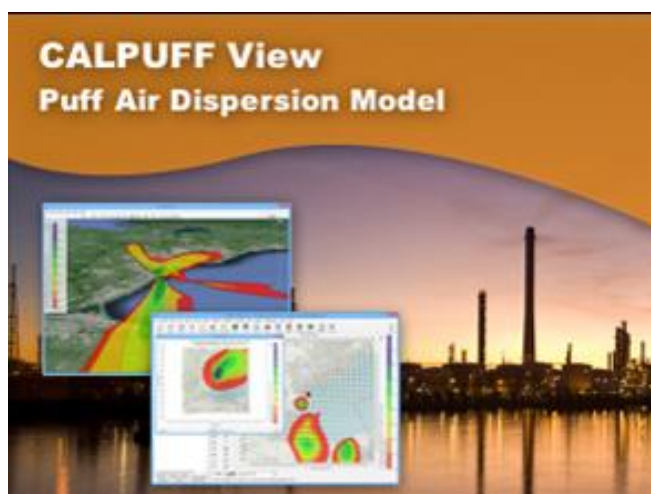


Figura 3-5 Programa comercial de simulación basado en CALPUFF. [5], [4], [25]

3.5 CMAQ

CMAQ (Community Multiscale Air Quality) es un modelo de dispersión de tipo Euleriano, desarrollado como proyecto open-source de la división de modelado de ciencia atmosférica de la EPA americana y que consiste en un conjunto de programas destinados a la simulación de la calidad del aire.

Los modelos de dispersión como CMAQ son quizás los más apropiados para las simulaciones sobre entornos urbanos o regionales y para obtener las concentraciones de contaminantes primarios y secundarios tanto reactivos como no reactivos.

CMAQ está diseñado para ser usado en un amplio espectro de aplicaciones relativas a la simulación de la calidad del aire utilizadas desde los ámbitos regulatorios hasta los de análisis y entendimiento de las interacciones complejas de la química y física de la atmósfera.

Como ya hemos mencionado CMAQ es un modelo Euleriano 3D, es decir permite simular con respecto a un eje de coordenadas de tres ejes, la química atmosférica y el transporte, permitiendo modelar y simular entre otros ozono, polvo (PM particulate matter), contaminantes tóxicos aéreos, visibilidad, contaminantes ácidos y contaminantes que afectan a los nutrientes en la troposfera. Diseñado como “una atmósfera” el modelo CMAQ puede ser utilizado para simular situaciones complejas de calidad del aire desde escalas locales hasta cubrir todo un hemisferio.

El modelo de dispersión CMAQ está soportado por el centro CMAS (Community Modeling and Analysis System).

La *Figura 3-6* muestra el diagrama de bloques de la parte de transporte químico del modelo de dispersión CMAQ.

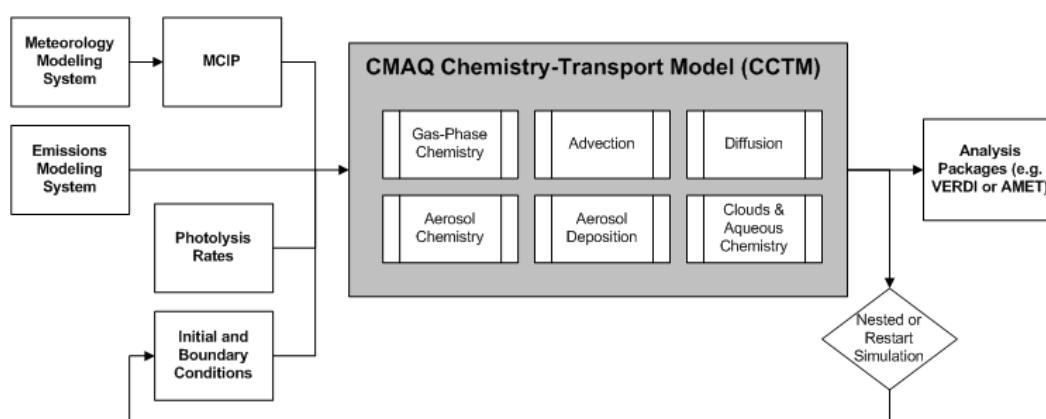


Figura 3-6 Diagrama de bloques de la parte de transporte químico del modelo CMAQ. [4], [26], [5]

3.6 DISPERSION21

El modelo de dispersión DISPERSION21 (también denominado DISPERSION 2.1) es un modelo de dispersión para escalas locales, desarrollado por la unidad de investigación de la calidad del aire del SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) radicado en Norrköping (Suecia).

El modelo DISPERSION21 se usa como herramienta en el cálculo de concentraciones de contaminantes atmosféricos originados por fuentes industriales y urbanas. Este modelo se puede usar para evaluar y simular la calidad del aire tanto de fuentes existentes como

en el análisis de planificación de fuentes no existentes. Es un modelo gaussiano de aplicación en escala local e incluye elevación de penacho y efectos de la estela de los edificios. También incluye un componente del efecto cañón de calles (street canyon) y química de NOx (reacciones foto-químicas).

Las principales características del modelo DISPERSION21 son:

- Tipos de fuentes: fuentes de puntos múltiples, áreas y volúmenes y también cañones de calle.
- Altura de las fuentes: Superficie, cerca de la superficie y fuentes elevadas.
- Ubicación de las fuentes: Urbanas y rurales.
- Tipos de penacho: Continuos e intermitentes flotantes.
- Tratamiento de la dispersión del penacho: modelo gaussiano y tratamiento usando funciones de Green e incluyendo múltiples reflexiones.
- Tipos de terrenos: terrenos simples planos con pendientes menores de 10 grados.
- Efectos de edificios: incluidos algoritmos de efectos de estela de edificios.
- Datos meteorológicos: El modelo incluye un pre-procesador para producir los parámetros meteorológicos necesarios para caracterizar las turbulencias atmosféricas y también los perfiles de dirección y velocidad del viento.
- Cañones de calles: el modelo incluye algunas reacciones fotoquímicas de química meteorológica.

Este modelo es muy usado en Suecia por agencias ambientales, usuarios industriales, servicios de consultoría ofrecidos por el SMHI y también para fines educativos.

En la *Figura 3-7* se muestra una simulación de cálculo de concentración de NOx utilizando el modelo de dispersión DISPERSION21.

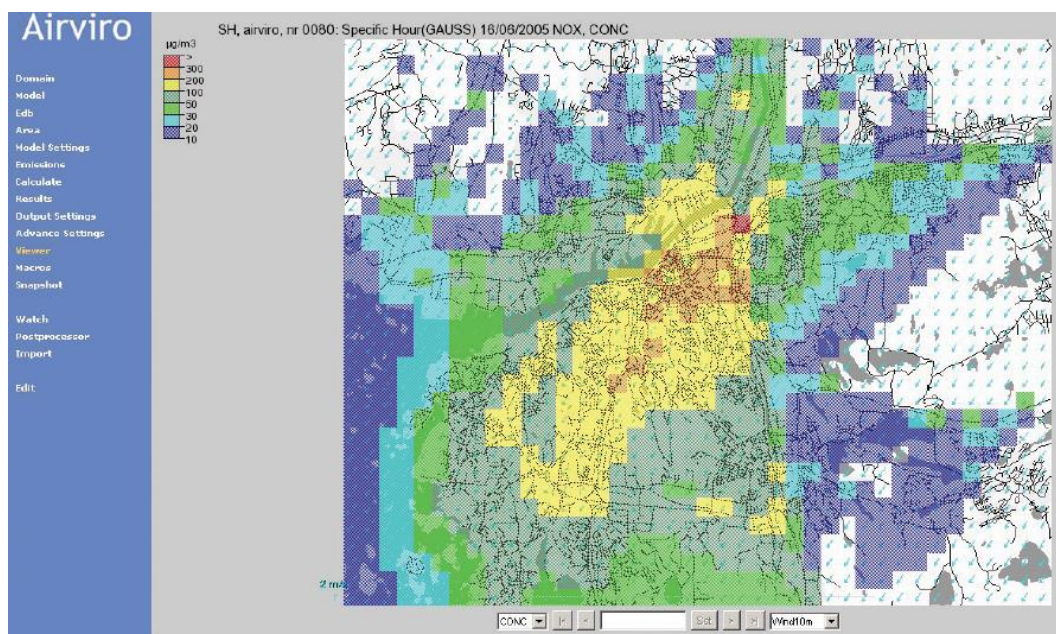


Figura 3-7 Simulación de cálculo de NOx con un programa basado en DISPERSION21. [27]

3.7 FLACS

El modelo de dispersión FLACS (FLame ACceleration Simulator) es un programa comercial de dinámica de fluidos desarrollado y comercializado por GexCon (Global Explosion Consultants) una compañía con sede en Noruega. Este modelo ha sido desarrollado para modelar la dispersión originada por la combustión de líquidos inflamables, gases y nubes de humo en espacios abiertos y en recintos acotados.

FLACS fue desarrollado inicialmente para modelar explosiones con nubes de vapor. GexCon integró más tarde código de un modelo de dispersión con el fin de predecir la extensión de la nube de vapor antes de modelar la combustión. GexCon anuncia en la última versión de FLACS que es adecuado para simular un amplio rango de dispersiones y flujos derivados de explosiones incluyendo la dispersión de sustancias químicas disueltas, mezclas homogéneas de gas y partículas en suspensión. Adicionalmente la versión 9 de FLACS es adecuado para modelar dispersión en superficies en pendiente, onduladas y geometrías complejas.

La *Figura 3-8* muestra ejemplos de aplicación del modelo FLACS en simulaciones de la nube de humo tras una explosión en una plataforma y simulación de dispersión de gas sobre un edificio.

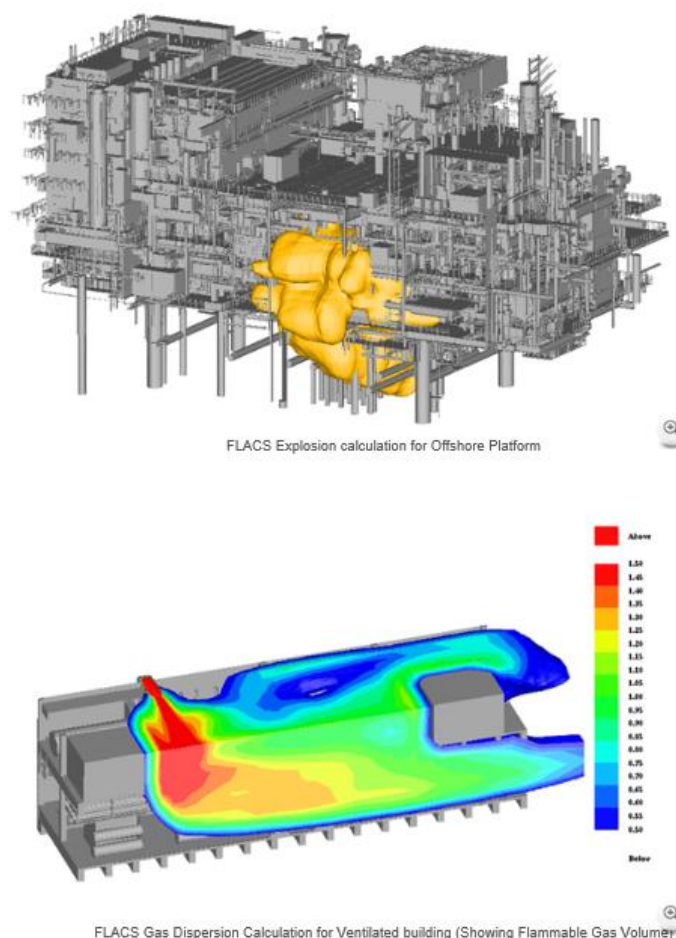


Figura 3-8 Ejemplos de aplicación del modelo FLACS. [28]

3.8 FLEXPART

El modelo de dispersión FLEXPART es un modelo de dispersión del tipo Lagrangiano para calcular la dispersión de partículas en distancias medias y grandes.

Por ejemplo es un modelo adecuado para calcular la dispersión de contaminantes tras una explosión en una planta nuclear.

El modelo FLEXPART ha ido evolucionando hasta convertirse en una herramienta muy útil y apreciada en el modelado y análisis del transporte de contaminantes. Esta evolución ha posibilitado su uso en una amplia variedad de análisis de calidad del aire donde el transporte juega un papel principal (por ejemplo el flujo intercambio entre la estratosfera y la troposfera o el ciclo global del agua).

La Figura 3-9 muestra resultados de simulaciones con el modelo de dispersión FLEXPART de la sensibilidad

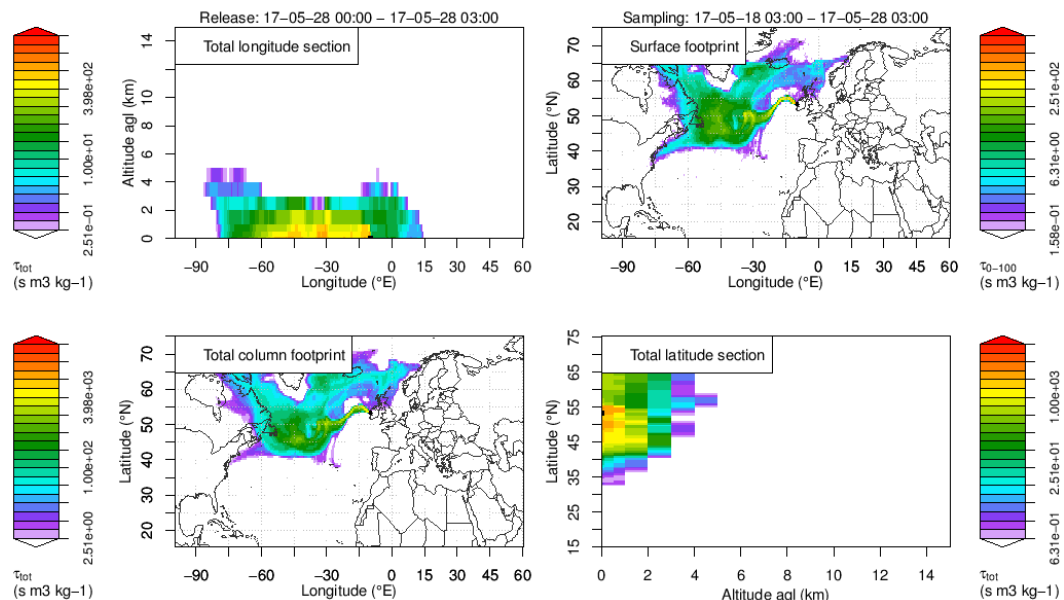


Figura 3-9 La figura muestra simulaciones con FLEXPART de una fuente de emisión. [29] [30]

3.9 HYSPLIT

El modelo HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) es un completo sistema para realizar cálculos de trayectorias de dispersiones complejas y simulaciones de deposiciones (inmisiones).

El desarrollo ha sido iniciado en un esfuerzo conjunto del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y la administración de meteorología de Australia.

Las últimas actualizaciones incluyen mejoras y nuevas funcionalidades como las siguientes:

- Algoritmo de advección (arrastre) mejorado.
- Mejoras en algoritmo de estabilidad y ecuaciones de dispersión.
- Mejoras de la interface de usuario.
- Posibilidad de incluir módulos de transformaciones químicas.

El modelo HYSPLIT calcula sin usar módulos adicionales la advección o arrastre de un tipo de partícula contaminante o una trayectoria simple.

La dispersión del contaminante se calcula asumiendo un modelo de emisión discontinua de ráfagas (puff) o un modelo de emisión continua de partículas.

En el modelo de emisión discontinua de ráfagas (puff), expande la ráfaga hasta que excede el tamaño de la celda meteorológica (ya sea horizontalmente o verticalmente) y posteriormente lo divide en varias ráfagas cada uno con su masa de contaminante.

En el modelo de emisión de partículas, un número fijo de partículas son arrastradas por el viento y dispersadas por el componente de turbulencia. Por defecto el modelo asume una configuración de distribución de partículas en tres dimensiones (horizontal y vertical).

La Figura 3-10 muestra la página principal del sitio web dedicado al modelo HYSPLIT en la Universidad de Huelva y que permite realizar simulaciones Online.

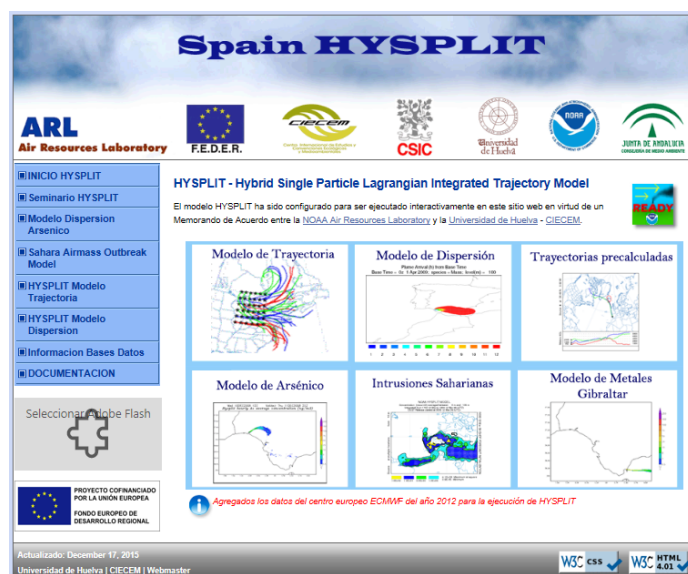


Figura 3-10 Página principal de la web del modelo HYSPLIT de la Universidad de Huelva. [31], [32]

3.10 HYPACT

El modelo de dispersión HYPACT (HYbrid Particle And Concentration Transport Model) ha sido desarrollado para simular el movimiento de los indicadores atmosféricos bajo la influencia de los flujos atmosféricos incluyendo las turbulencias.

En la versión actual HYPACT se suele usar utilizando como entrada la salida de datos meteorológicos de RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), sin embargo con

pequeños ajustes es posible usarlos con otros datos meteorológicos de entrada incluyendo datos provenientes de la observación directa.

Aunque RAMS puede por sí mismo simular los movimientos de cualquier número de campos de indicadores Eulerianos, el uso de HYPACT presenta ventajas por su capacidad de ejecutar el cálculo de la dispersión como un paso de post-proceso y debido a su formulación Lagrangiana.

La ventaja es mayor en la región cercana para indicadores cuando la fuente es de pequeña escala y sin resolución en la rejilla Euleriana.

RAMS requiere representar una fuente como un volumen mínimo de una celda de la rejilla la cual comienza a dispersar en las celdas adyacentes. Por otra parte el modelo Lagrangiano es capaz de representar una fuente de cualquier tamaño y mantener concentrado el indicador en el penacho en la dirección del viento hasta que la dispersión atmosférica impone que el penacho se expanda.

Una característica única de HYPACT es que una vez que el penacho Lagrangiano de partículas comienza a ser suficientemente ancho en la dirección del viento, desde la región de la fuente se puede convertir en una concentración de campo de arrastre bien resuelta con una formulación Euleriana. Esta aproximación híbrida permite que puedan especificarse proporciones elevadas de emisión para una fuente y con una buena resolución de penacho sin retener un número elevado de partículas que se acumulen. Las fuentes de indicadores bien resueltas en rejilla pueden especificarse como fuentes en una malla en HYPACT y transportadas por una formulación Euleriana. HYPACT lleva a cabo una predicción de indicadores mucho más rápida que RAMS porque no predice su propio viento, presión, temperatura, humedad o campos de turbulencia.

Para ejecutar HYPACT con datos obtenidos con RAMS, es necesario generar con RAMS unas series de ficheros de “análisis” conteniendo el viento, temperaturas previstas, turbulencias y campos de energía cinética en tiempos de salida de la simulación atmosférica. HYPACT lee los datos de estos ficheros y los interpola en el tiempo para determinar el transporte y la difusión. Para la predicción de concentraciones Eulerianas, HYPACT asigna el tiempo interpolado de las series de datos a las series anidadas rejillas idénticas a las obtenidas en la simulación de RAMS que ha generado los ficheros de “análisis”. La predicción de concentraciones en estas rejillas se realiza utilizando los valores especificados iniciales y las características de las fuentes. Para la predicción Lagrangiana de partículas, el viento y las turbulencias interpolados en el tiempo también se interpolan en el espacio para cada indicador de partícula Lagrangiano.

Si se han usado rejillas anidadas en la simulación RAMS, la rejilla más pequeña definida para cada ubicación es la usada para la interpolación. Las partículas se han movido a través del espacio y del tiempo basadas en la velocidad del viento interpoladas a las que se añade una componente aleatoria escalada según la intensidad de la turbulencia local. Una componente de velocidad de deposición gravitacional puede añadirse también al movimiento de las partículas.

La *Figura 3-11* muestra la estructura de datos y los pre-procesadores utilizados por el modelo HYPACT y la muestra los resultados de una simulación de

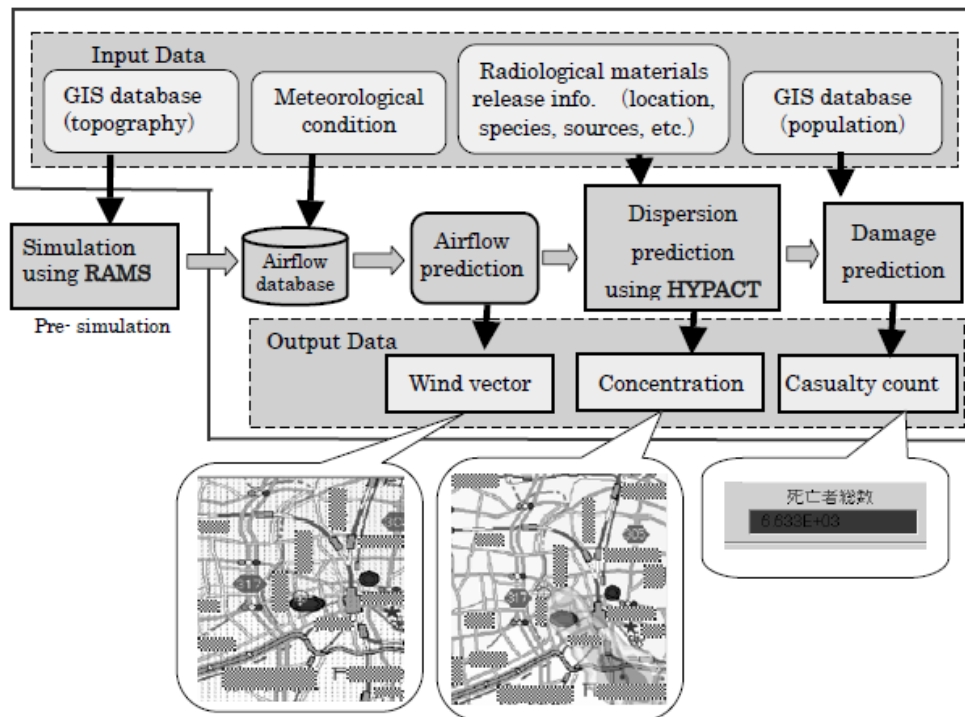


Figura 3-11 Estructura de datos y pre-procesadores del modelo HYPACT. [33], [5]



Figura 3-12 Resultados 3D de simulación con HYPACT de dispersión de partículas en un complejo de edificios. [33], [5]

3.11 ISC3

El modelo ISC3 (Industrial Source Complex, Version 3) es un modelo estacionario gaussiano de penacho que puede usarse para evaluar concentraciones de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociados a un complejo o polígono industrial. Durante muchos años ha sido el modelo de dispersión recomendado o preferente de la EPA para modelar el impacto de fuentes a nivel de suelo o fuentes elevadas en terreno plano o de

baja complejidad. Desde 2006 ha sido reemplazado por AERMOD como modelo recomendado preferente por la EPA y ahora pertenece a la lista de modelos alternativos aunque todavía se sigue usando.

El modelo ISC3 puede operar tanto en modo corto plazo (ISCST3) como en modo largo plazo (ISCLT3). Sin embargo los datos meteorológicos de entrada necesarios son completamente diferentes para los dos modos.

El paquete mínimo de datos meteorológicos necesarios por el modelo a corto plazo ISCST3 para cada hora de simulación está compuesto por:

- Vector de flujo (el cual es el opuesto a la dirección del viento).
- Velocidad del viento.
- Temperatura.
- Clase de estabilidad Pasquill-Gifford.
- Altura combinada rural y altura combinada urbana.

Si además se desean calcular las deposiciones seca y húmeda, es necesario añadir las siguientes variables:

- Velocidad de fricción.
- Longitud Monin Obukhov.
- Longitud de la rugosidad de la superficie.
- Índice de precipitaciones y tipo de precipitaciones.

Los datos meteorológicos necesarios para el modelo a largo plazo ISCLT3 son la distribución de frecuencias agregadas de dirección del viento para cada clase de estabilidad (Pasquill-Gifford), conocida como STAR (STability ARray).

Los algoritmos del modelo mejorado elevación de penacho PRIME (Plume Rise Model Enhancement), que mejoran el tratamiento de la dispersión descendente en escenarios con edificios, se han incorporado al modelo ISCST3 que ha pasado a denominarse ISC-PRIME.

La versión análisis selectivo de ISC3 es SCREEN3. ISC3 también usa el sistema de modelado de contaminantes peligrosos EMS-HAP (Emissions Modeling System for Hazardous Pollutants) para procesar un inventario de emisiones como entrada al modelo.

El programa de entrada de perfil de edificios BPIP (Building Profile Input Program) y el programa de entrada de perfil de edificios que afecta al penacho BPIPPRM (Building Profile Input Program for PRIME) pueden usarse con ISC3 para calcular correctamente la altura de los edificios (bh) y las anchuras de los edificios proyectados (pbw) de una fuente simple, de fuentes multinivel y estructuras.

La *Figura 3-13* muestra dos ejemplos de simulaciones con el modelo de dispersión ISC3 a corto plazo y a largo plazo. La *Figura 3-14* muestra ampliada la simulación ISC3 a corto plazo (ISC3ST) y la *Figura 3-15* muestra ampliada la simulación ISC3 a largo plazo (ISC3LT).

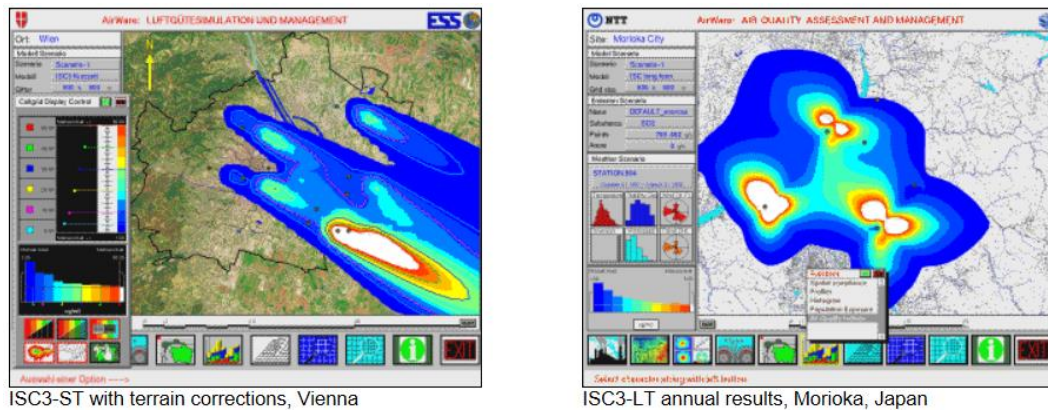


Figura 3-13 Ejemplos de simulaciones con el modelo de dispersión ISC3 a corto plazo y a largo plazo. [5], [34]

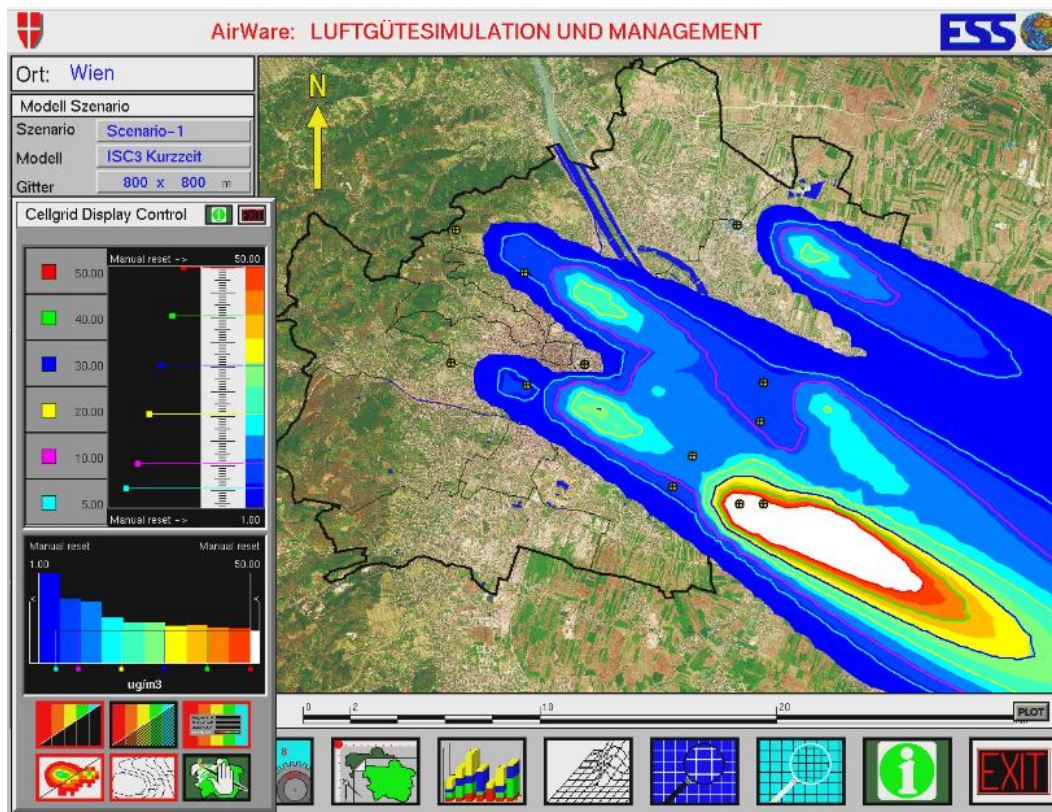


Figura 3-14 Simulación del modelo ISC3 a corto plazo (ISC3ST). [5], [34]

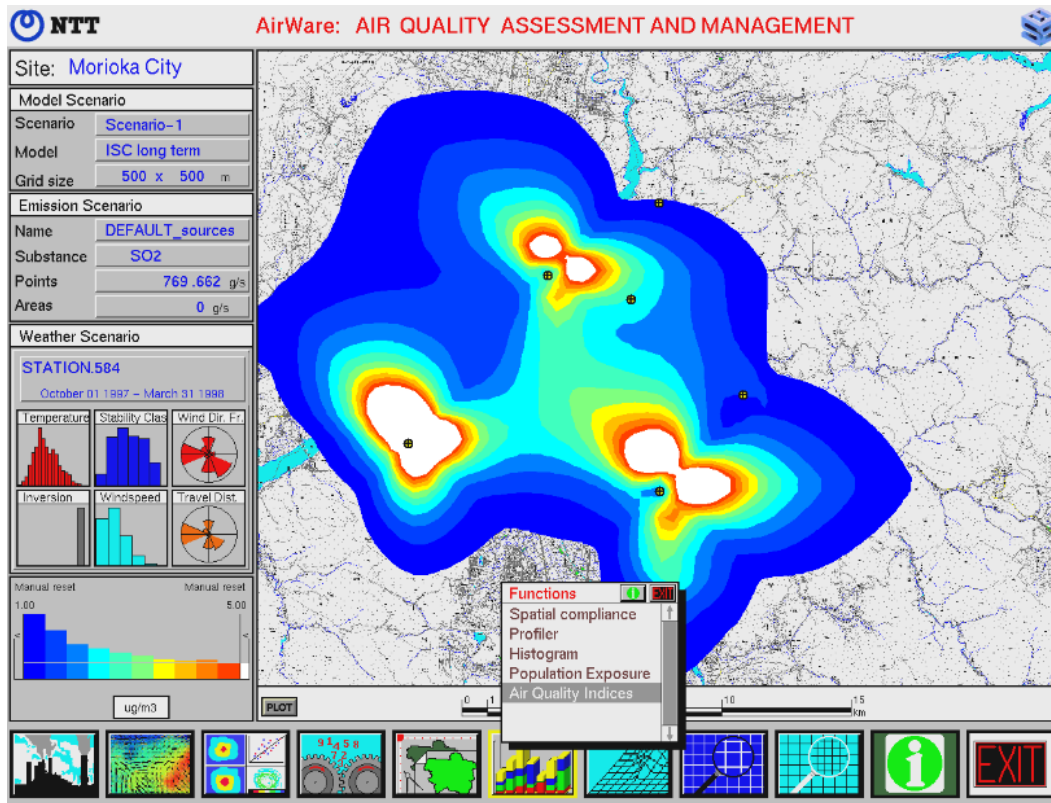


Figura 3-15 Simulación del modelo ISC3 a largo plazo (ISC3LT). [5], [34]

3.12 NAME

El modelo de dispersión NAME (Numerical Atmospheric dispersion Modeling Environment) es un modelo Lagrangiano que calcula la dispersión de partículas utilizando una atmósfera modelada. Las partículas se mueven con el viento obtenido a través de la meteorología y que puede variar en el espacio y en el tiempo. El movimiento de las partículas incluye un componente aleatorio para simular las turbulencias atmosféricas. Como consecuencia, no es necesario realizar asunciones acerca de la forma de la concentración de contaminantes como las requeridas en los modelos de penacho Gaussianos. Los contaminantes también pueden ser eliminados del modelo de atmósfera por varios procesos:

- Caída debida a la gravedad.
- Impacto con la superficie.
- Lavado de los contaminantes debido a la caída de la lluvia.
- Absorción en las nubes en el proceso de formación de las gotas de lluvia.

Adicionalmente cada “partícula” del modelo tiene sus propias características, por ejemplo las partículas pueden representar diferentes compuestos químicos y tener su tamaño real.

NAME es por tanto una herramienta sofisticada capaz de simular muchos fenómenos de dispersión atmosférica y sus procesos físicos y químicos asociados. NAME es capaz de simular en las dos direcciones: hacia el futuro y hacia atrás en el tiempo (p.e. para identificar las fuentes).

El modelo de dispersión NAME ha sido desarrollado por la Met Office de UK, después del accidente nuclear de Chernobyl, el cual ha demostrado la necesidad de disponer de un método que pueda usarse para predecir la dispersión y deposición de gases radioactivos y el material liberado a la atmósfera.

De hecho el acrónimo original de NAME tenía relación con este tipo de contaminantes ya que era “Nuclear Accident Model”.

NAME es usado por la Met Office para modelar un amplio rango de eventos con dispersiones atmosféricas incluyendo accidentes nucleares, erupciones volcánicas, accidentes químicos, humos de incendios, enfermedades de animales transmisibles por el aire y también procedimientos rutinarios de predicción de la calidad de aire. En el modo inverso NAME se utiliza para investigar emisiones de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

El modelo NAME se usa en actividades de investigación y también en perdiciones de emergencias de contaminación atmosférica. La *Figura 3-16* muestra la simulación con NAME de una emisión de una central de nuclear tras 5 horas de la emisión.

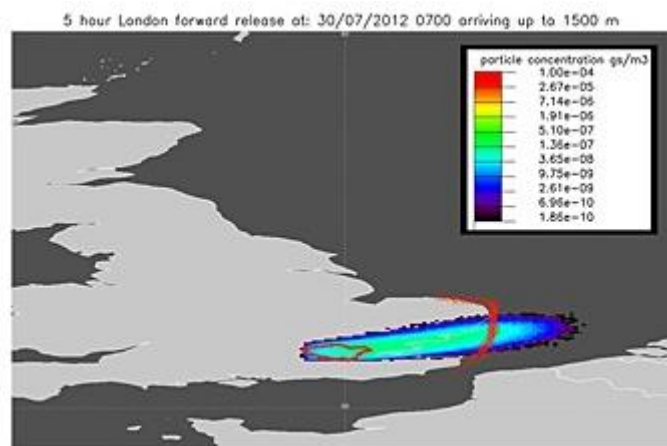


Figura 3-16 Simulación con NAME de la emisión de una central nuclear después 5 horas. [35]

3.13 MERCURE

El modelo MERCURE es un programa de cálculo de dinámica de fluidos (CFD computational fluid dynamics) desarrollado por la empresa Electricite de France (EDF) y distribuido por la compañía francesa ARIA Technologies. [36]

El modelo MERCURE es la versión de dinámica de fluidos del paquete de software ESTET (Ensemble de Simulations Tridimensionnelles d'Écoulements Turbulents)

desarrollo por el “Laboratoire National d'Hydraulique” perteneciente a EDF. Debido a esta circunstancia MERCURE se beneficia de las continuas mejoras que se aplican a ESTET.

MERCURE es un modelo especialmente adecuado para modelar la dispersión de contaminación en el aire a escala local, con las siguientes características principales:

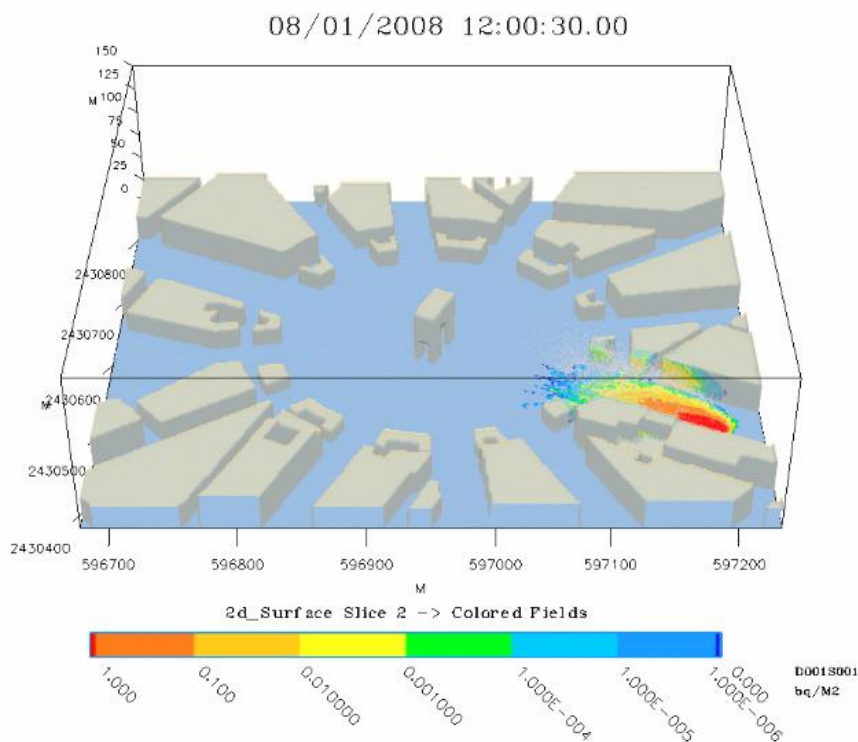
- Tipos de fuentes de polución: Puntuales y en línea, de emisión continua o intermitente.
- Tipos de penacho: Ligeros flotantes y de gas denso.
- Deposición: El modelo es capaz de simular las deposiciones y el decaimiento del contaminante del penacho.

ARIA puede integrar MERCURE como módulo en su paquete de software “ARIA RISK” utilizado en análisis de riesgo en el ámbito industrial.

El modelo MERCURE es usado por muchas organizaciones, sobre todo en Francia, entre las cuales destacan:

- Electricite de France (EDF).
- Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'Ecole Centrale de Lyon, Francia.
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Fontenay, Francia.
- La agencial nacional italiana para la Nueva Tecnología, Energía y Entorno (ENEA), Bologna, Italia.
- Queensland University of Technology, Brisbane, Australia

La Figura 3-17 adjunta muestra varias secuencias de una simulación con el paquete ARIA Risk.



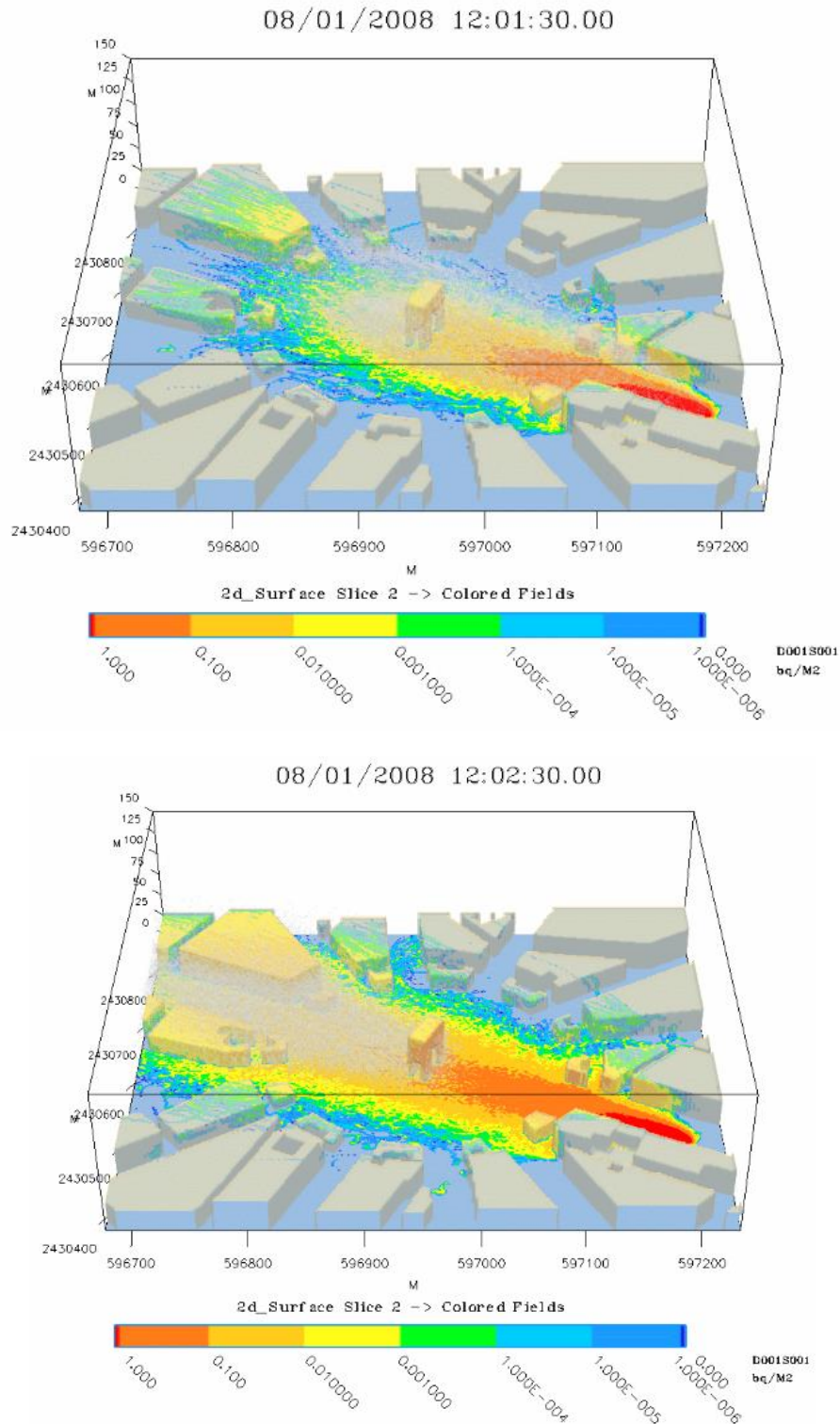


Figura 3-17 Secuencias de una simulación con el paquete ARIA Risk. [36], [35]

3.14 OSPM

El modelo de dispersión OSPM (Operational Street Pollution Model) ha sido desarrollado por el departamento de Ciencias Ambientales de la Aarhus University de Dinamarca.

OSPM es un modelo híbrido que combina varios modelos para calcular principalmente la contaminación debida al tráfico en las calles de la ciudad.

Las concentraciones de los gases emitidos se calculan usando una combinación de un modelo de penacho para la componente de contribución directa y un modelo de caja para la componente de contribución de re-circulación los contaminantes en la calle.

Como habíamos mencionado anteriormente la contribución directa se calcula usando un modelo de penacho simple. Se asumen que las emisiones y las circulaciones se distribuyen uniformemente a través del cañón. El campo de emisión se trata como un conjunto de fuentes de línea infinitesimales alineadas perpendicularmente a la dirección del viento al nivel de calle. La difusión en contra del viento se desprecia. La dirección del viento a nivel de calle se asume que se refleja en espejo con respecto al nivel de techo del viento. La expresión del penacho de la fuente de línea se integra a lo largo del camino definido por el viento a nivel de calle. La longitud del camino de integración depende de la extensión de la zona de circulación.

La longitud del remolino calculando en la dirección del viento es 2 veces la altura de los edificios a contra-viento.

El nivel techo del viento se considera cuando la velocidad del viento se reduce en 2 m/s, la longitud del remolino decrece de forma lineal con la velocidad del viento.

Los edificios a lo largo de la calle pueden tener diferentes alturas, afectando de esta forma a la longitud de los remolinos y por consiguiente a las concentraciones modeladas.

Suponemos una altura inicial: $h_o = 2\sim 4$ metros (dependiendo de la velocidad del viento).

El receptor a contra-viento (lado de sotavento) recibe la contribución de las emisiones de tráfico dentro del área ocupada por el remolino (zona de re-circulación), la contaminación re-circulada y una porción de las emisiones de fuera del área del remolino.

Cuando la velocidad del viento se aproxima a cero o es paralelo a la calle, las concentraciones en ambos lados de la calle comienzan a ser iguales.

La dispersión vertical se modela asumiendo un crecimiento lineal del penacho a medida que aumenta la distancia con la fuente.

La contribución de la componente de re-circulación se calcula con un modelo de celda fija. Se asume que el remolino del cañón tiene una forma de trapecio, con el lado más largo en la parte superior y siendo su longitud la mitad de la longitud del remolino. La ventilación de la zona de re-circulación tiene lugar en los bordes del trapecio pero puede verse limitada por la presencia de edificios en la dirección del viento que intercepten alguno de los bordes. La concentración en la zona de re-circulación se calcula asumiendo que el porcentaje de afluencia o entrada de contaminantes en la zona de re-circulación es

igual al escape o salida de contaminantes y que estos contaminantes se han mezclado completamente dentro de la zona.

La turbulencia dentro del cañón se calcula tomando en cuenta la turbulencia producida por el tráfico (TPT Traffic Produced Turbulence).

La TPT juega un papel crucial en la determinación de los niveles de contaminantes en los cañones de calles. Durante las situaciones sin viento la turbulencia ambiental desaparece y el único mecanismo de dispersión es debido a la TPT. De este modo la TPT se convierte en el factor crítico que determina los altos niveles de contaminación en el cañón de calle.

El modelo OSPM puede usarse para calles con edificios irregulares o incluso edificios solo en uno de los lados pero por supuesto es el modelo adecuado para configuraciones con calles regulares que conforman cañones de calle. El modelo no debe usarse para pasos de peatones o para ubicaciones muy alejadas de los carriles.

La concentración de contaminantes en la calles se calcula tomando en cuenta las fluctuaciones de la dirección del viento. Para cada hora de cálculo, la concentración resultante se promedia con el sector centrado alrededor de la media de la dirección del viento en la hora de cálculo. La anchura del sector de promedio depende del nivel de techo de la velocidad de viento y se incrementa cuando la velocidad del viento decrece. En situaciones de calma la media del sector se aproxima a 360°, lo que resulta en una distribución de concentración uniforme a lo largo de la calle.

Las concentraciones NO₂ se calculan tomando en cuenta la química NO-NO₂-O₃ y el tiempo de permanencia de los contaminantes en la calle. La presencia de NO₂ en el aire ambiental se mantiene debido a la oxidación del NO emitido por el ozono de fondo. En condiciones de ambiente soleado, la foto-disociación del NO₂ lleva a la producción parcial de NO y O₃ ($\text{NO} + \text{O}_3 \rightleftharpoons \text{NO}_2 + \text{O}_2$).

La relación entre el NO₂ y las concentraciones de NO_x en el aire ambiental no es lineal y depende de la concentración de ozono. Las escalas de tiempo que caracteriza estas reacciones son del orden de decenas de segundos, comparable en tiempo con el tiempo de permanencia de los contaminantes en el cañón de calle. Consecuentemente las transformaciones químicas y el intercambio de aire del cañón de calle con el aire del ambiente son importantes para la formación de NO₂.

El modelo OSPM está diseñado para trabajar con entradas y salidas en forma de medias horarias.

Los valores requeridos de entrada son medias horarias de velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y radiación global. Los dos últimos parámetros son usados para calcular la transformación química del NO-NO₂-O₃. El modelo requiere también promedios horarios de las concentraciones urbanas de fondo de los contaminantes modelados. Además los parámetros horarios de entrada, el modelo requiere los datos de la geometría y el tráfico de la calle.

La *Figura 3-18* adjunta muestra la estructura del modelo OSPM y la *Figura 3-19* muestra el concepto operacional de la contaminación de calle.

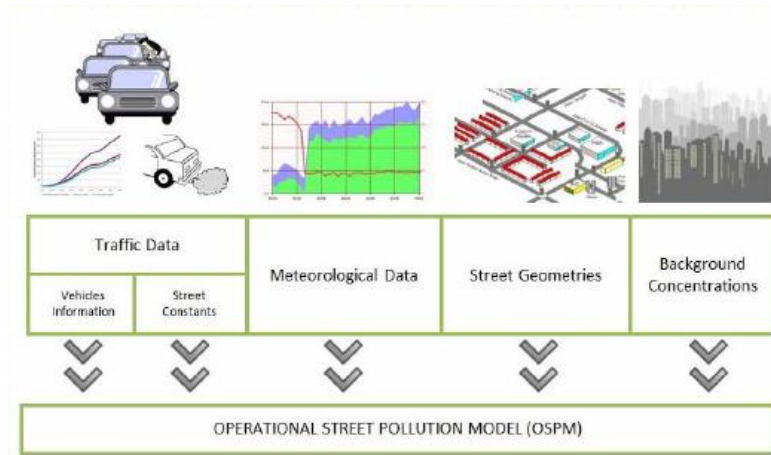


Figura 3-18 Estructura del modelo OSPM. [37], [38]

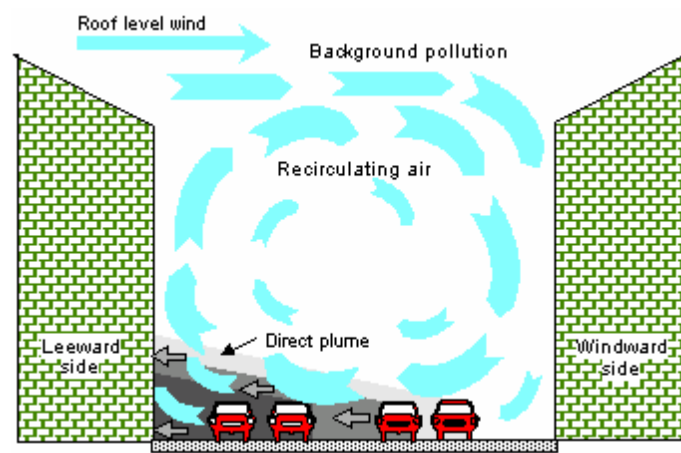


Figura 3-19 Concepto operativo de la contaminación de calle. [37], [38]

3.15 FLUIDYN-PANACHE

PANACHE es un paquete de software desarrollado por Fluidyn para la simulación de la dispersión atmosférica de contaminantes y predicción de la calidad del aire. PANACHE es un modelo híbrido que combina modelo de ráfagas (Puff), modelo Gaussiano y modelos de transporte basados en gradiente.

PANACHE puede ejecutarse sobre modelos de terrenos simples y complejos y constituye una herramienta para el análisis industrial de riesgo ambiental y el análisis 3D de la dinámica de fluidos.

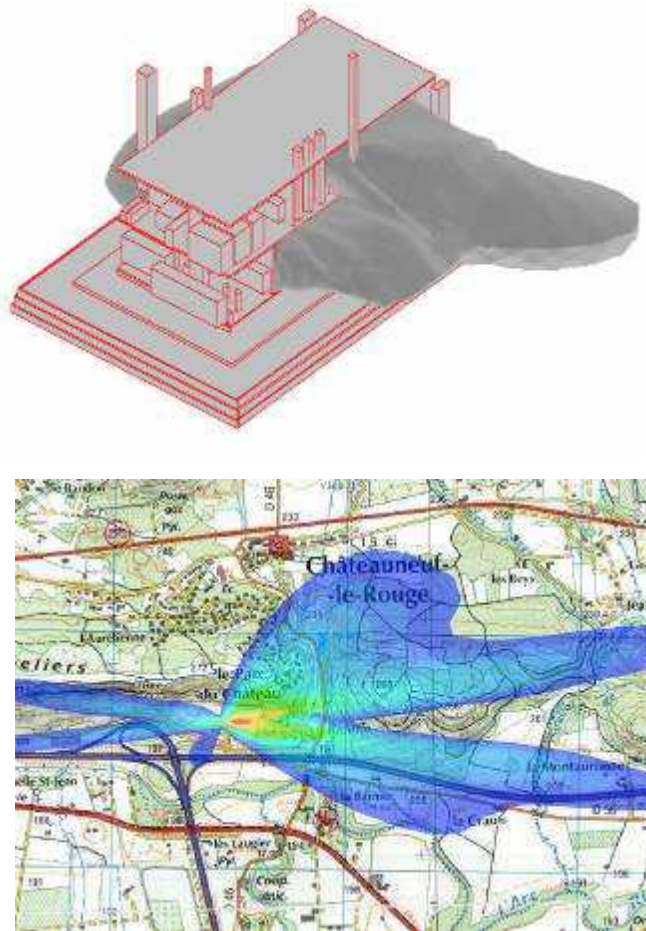
Las utilidades de modelado de Fluidyn – PANACHE incluyen soluciones deterministas de las ecuaciones de la dinámica de fluidos presentada en 3D de mallas estructuradas o no estructuradas.

Fluidyn – PANACHE toma en cuenta diferentes fenómenos físicos como los siguientes:

- Escalas de dispersión pequeña y grande.
- Efectos topográficos complejos 3D.
- Efectos de obstáculos y edificios.
- Efectos de diferentes tipos de superficie (hierba, asfalto, etc.).
- Condiciones ambientales (incluyendo viento débil).
- Turbulencias atmosféricas y turbulencias mecánicas alrededor de obstáculos.
- Liberaciones transitorias o continuas de cualquier tipo de contaminante (gases pesados, gases calientes, gases ligeros, partículas, etc.).

Una interface de usuario amigable permite un uso fácil y rápido de las herramientas Fluidyn – PANACHE para las fases de pre-procesado (construcción de modelos numéricos, definición de fuentes, mallas, etc.) y pos-procesado (análisis de resultados).

La *Figura 3-20* muestra varios ejemplos de simulación con el modelo de dispersión FLUIDYN-PANACHE.



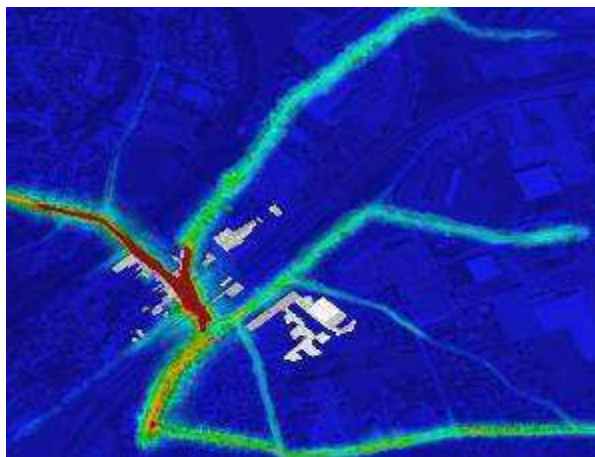


Figura 3-20 Ejemplos de simulación con el modelo FLUIDYN-PANACHE. [39]

3.16 RIMPUFF

El modelo RIMPUFF es un modelo de dispersión para emisiones discontinuas de tipo ráfaga en escala local desarrollado por el laboratorio Risø National Laboratory de Dinamarca.

El modelo RIMPUFF proporciona simulaciones detalladas en tiempo real de dispersión atmosférica teniendo en cuenta las variaciones del viento, turbulencias y la dispersión.

Es un modelo de dispersión para emisiones discontinuas de tipo ráfaga (Puff) adecuado para simular dispersiones de fuentes de ráfaga y penacho en periodos de tiempo y espacio con meteorología cambiante.

El modelo está optimizado para su ejecución en ordenador personal tipo PC e incorpora una característica de dividir la ráfaga (Puff), para gestionar la bifurcación del penacho y la divergencia de flujo debido a las canalizaciones, flujo en pendiente y efectos de inversión en terreno no uniforme.

El modelo RIMPUFF incluye rutinas para el cálculo rápido de dosis de radiación gamma de isótopos radioactivos dispersados por el aire y deposiciones provenientes de liberaciones a la atmósfera de una planta nuclear.

En RIMPUFF el proceso de difusión del penacho o ráfaga está controlado por los niveles de turbulencia local, provenientes de medidas in situ, o suministrados a través de cálculos realizados con pre-procesador. RIMPUFF está equipado además con fórmulas de elevación de penacho, inversión y capacidades de reflexión a nivel del suelo, algoritmos de dosificación gamma y reducción húmeda y seca.

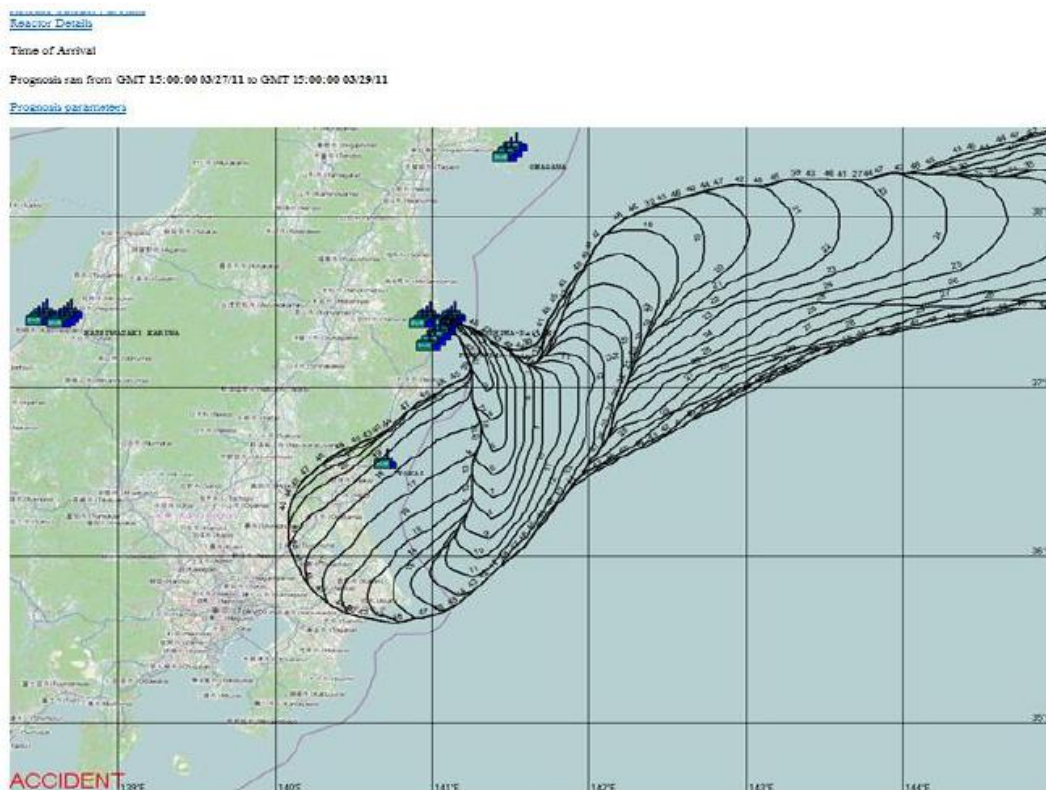


Figura 3-21 Ejemplo de simulación con RIMPUP de accidente nuclear Fukushima.
[40], [38]

3.17 SAFE AIR

El modelo de dispersión SAFE AIR (Simulation of Air pollution From Emissions Above Inhomogeneous Regions) que ha sido desarrollado por el departamento de Física de la Universidad de Génova, Italia.

El modelo SAFE AIR simula el transporte y la difusión de contaminantes en el aire sobre terreno complejo en escala local y regional.

SAFE AIR es muy versátil en el sentido de que el usuario puede seleccionar el nivel de complejidad y detalle y de ahí adaptar el nivel de proceso o computación requerido para cada tipo de aplicación.

SAFE AIR se compone de tres partes: dos pre-procesadores meteorológicos enlazados WINDS (Wind-field Interpolation by Non Divergent Schemes) y ABLE (Acquisition of Boundary Layer parameters) y el código P6 (Program Plotting Paths of Pollutant Puffs and Plumes) que simula el transporte y la difusión de contaminantes en el aire.

WINDS es un modelo que diagnostica las masas y reconstruye el campo de viento en 3D en un terreno complejo en mesoescala y con los datos de viento disponibles.

ABLE es un modelo que calcula la distribución horizontal y los parámetros relevantes de la capa adyacente como altura de mezcla, longitud Monin-Obukhov, velocidad de

fricción y escala de velocidad convectiva a partir de las variables meteorológicas medidas de forma rutinaria. Una buena parametrización de estos parámetros micro-meteorológicos son indispensables para simular la difusión de contaminantes en la baja atmósfera.

P6 es un modelo Lagrangiano multi-fuente que usa segmentos de penacho Gaussiano y ráfagas (Pufs) para simular la dispersión contaminantes en el aire de tal forma que permite realizar simulaciones numéricas en condiciones no estacionarias y no homogéneas. Los contaminantes emitidos se dividen en una secuencia de elementos o ráfagas cuya dinámica es función de las condiciones meteorológicas. Dado que los parámetros meteorológicos varían con el tiempo y el espacio, cada elemento evoluciona de acuerdo a las condiciones meteorológicas encontradas en su trayectoria. Los segmentos proporcionan una simulación rápida numérica de la dispersión de contaminantes cerca de su fuente durante las condiciones de transporte; los s permite simular adecuadamente tanto la difusión lejos de la fuente como en situaciones de calma de viento.

P6 ha sido diseñado principalmente para simular el impacto en la calidad del aire desde fuentes puntuales, no obstante también puede utilizarse, con pequeñas modificaciones, para fuentes en línea, fuentes de área y fuentes de volumen.

La *Figura 3-22* muestra dos simulaciones en diferentes momentos de una emisión de dióxido de azufre utilizando el modelo SAFE AIR.

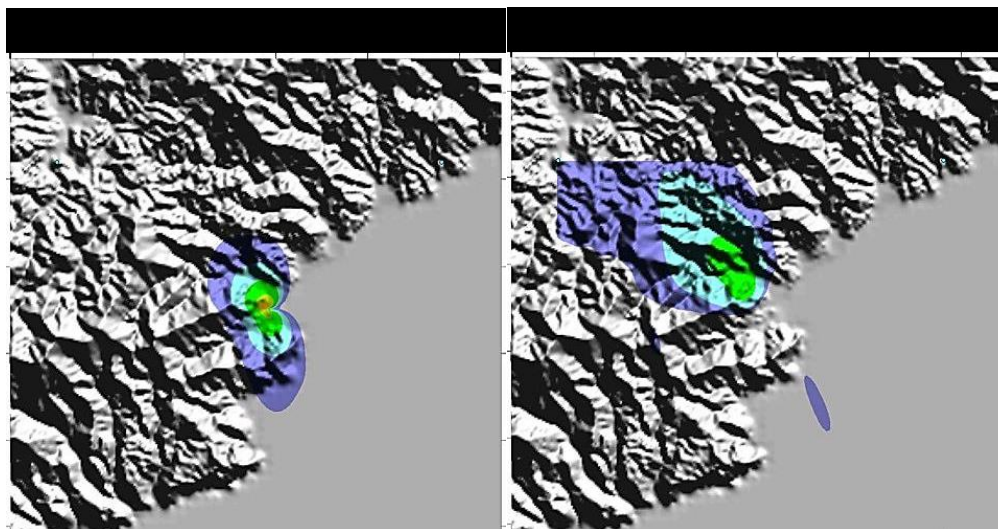


Figura 3-22 Simulaciones de una emisión de dióxido de azufre con SAFE AIR. [41]

3.18 PUFF-PLUME

El modelo de dispersión PUFF-PLUME es un modelo Gaussiano que modela el transporte atmosférico de radio-nucleídos y sustancias químicas y que incluye deposiciones húmeda y seca, entrada de observaciones y perdiciones meteorológicas en tiempo real, estimación de dosis de inhalación, resplandor gamma (es decir radiación) y modos de dispersión a ráfagas o penacho.

Es el modelo principal y recomendado por Departamento de Estado de Energía de Estados Unidos para usar en la respuesta de emergencia ante liberaciones a la atmósfera durante el procesado de material nuclear.

Ha sido desarrollado por el laboratorio “Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) en los años 1970.

En la *Figura 3-23* adjunta se muestra una simulación de transporte realizada con el modelo PUFF-PLUME.

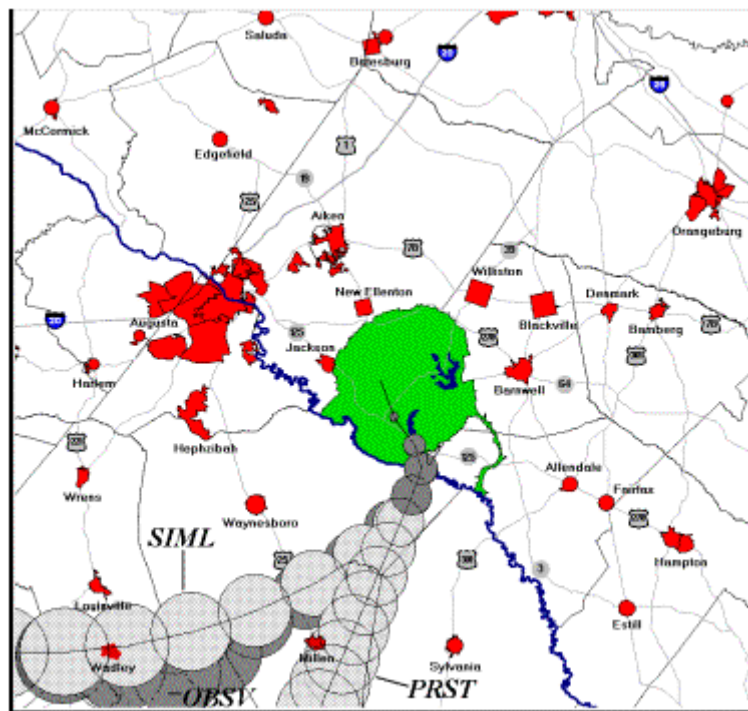


Figura 3-23 Simulación de transporte realizada con el modelo PUFF-PLUME. [42]

3.19 LILLPELLO

El modelo LILLPELLO es un modelo Lagrangiano que ha sido desarrollado por la agencia Sueca de Investigación de la Defensa para simular la dispersión atmosférica de gases inicialmente solo de gases ligeros y más tarde también gases densos.

Para incorporar la simulación de gases densos se han incorporado al modelo ecuaciones de energía, cantidad de movimiento (vertical y horizontal) y masa. El modelo ha sido contrastado con datos experimentales de escapes de amoníaco (NH₃).

La Figura 3-24 muestra la simulación de una emisión de gas tras 420 segundos realizada con el modelo LILLPELLO.

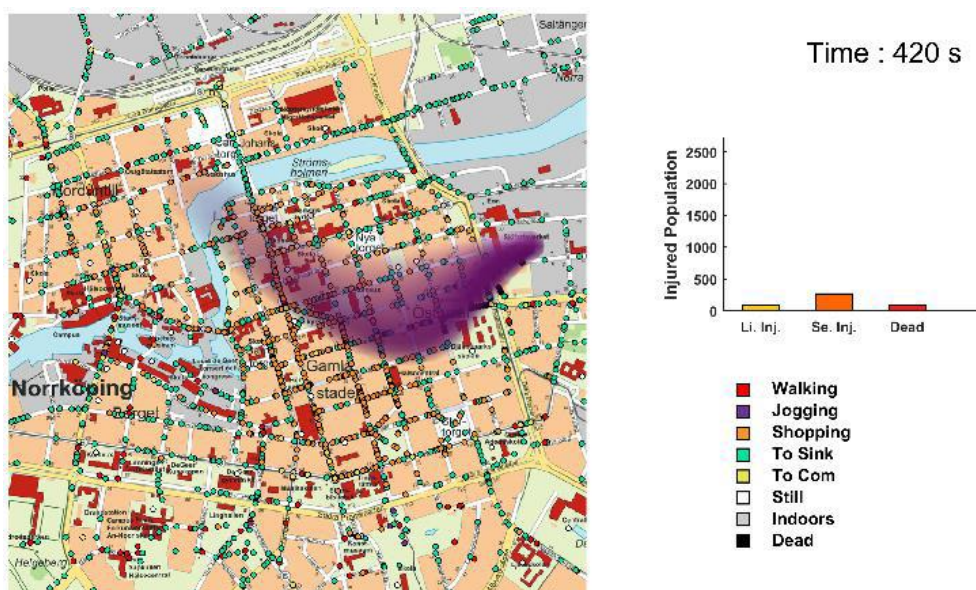


Figura 3-24 Simulaciones de emisión de gas realizada con modelo LILLPELLO.
[43]

3.20 PUMA

La agencia de Investigación para la Defensa Sueca (FOI) ha desarrollado una suite de programas para el cálculo de la dispersión atmosférica denominada FOI Dispersion Engine (DE). En DE se han incluido varios modelos que juntos abarcan los espectro temporales y escalas espaciales necesarias para afrontar los problemas de dispersión.

El modelo de dispersión PUMA ha sido diseñado para operar en tiempo real y utiliza ráfagas Gaussianas en una aproximación Lagrangiana. Las ráfagas son semi-simétricas que de forma conjunta representan el campo de concentración completo de una o varias fuentes. En caso de gas neutral las ráfagas son independientes unas de otras y evoluciona

debido a la parametrización de la turbulencia a medida que avanza de acuerdo a las circunstancias meteorológicas. El modelo de PUMA se ha expandido para incluir la física de gases densos. Se ha desarrollado e implementado el fenómeno principal que captura el caso de gas denso no lineal.

La introducción del gas denso conlleva la transición de ráfagas independientes a dependientes. Debido a que la principal idea del modelo PUMA es que sea tan rápido como sea posible, las ráfagas son tratadas individualmente hasta el largo alcance. Básicamente cada ráfaga es tratada separada e individualmente con la inclusión de la física de gas denso. En el siguiente paso de ejecución se tratan las dependencias entre ráfagas.

El modelo todavía sigue actualmente en desarrollo y evolucionando sus características.

La Figura 3-25 muestra simulaciones comparativas realizadas con el modelo PUMA y datos de referencia experimentales suministrados por INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques).

Nota: El lado izquierdo muestra una visión ampliada en la zona de emisión y el lado derecho todo el campo afectado.

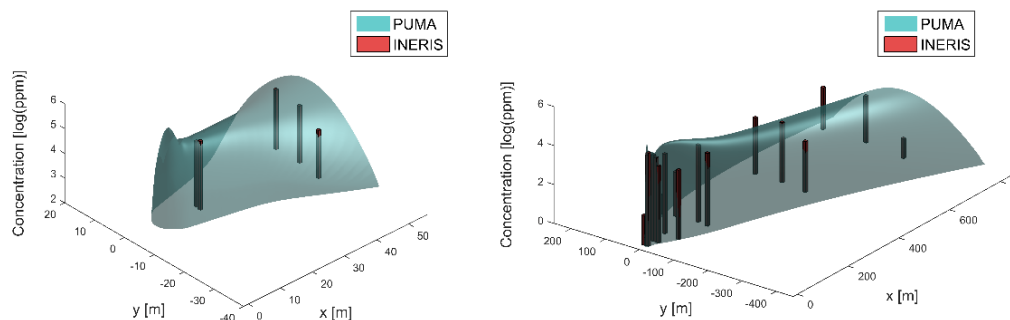


Figura 3-25 Simulaciones comparativas de modelo PUMA y datos de referencia de INERIS. [44], [45]

4 MODELO DE DISPERSIÓN

AERMOD

En este capítulo se aborda en detalle el modelo de dispersión AERMOD así como sus módulos pre-procesadores:

- AERMET, procesador de datos meteorológicos.
- AERMAP, preprocesador de datos terreno.
- También presentaremos brevemente los módulos complementarios:
- AERSURFACE, preprocesador de superficies para AERMET.
- AERSCREEN, modelo simplificado de detección o cribado (screening).
- MAKEMET, preprocesador de datos meteorológicos para AERSCREEN.
- BPIPPRIME, módulo de cálculo para contemplar el efecto de múltiples edificios en las proximidades de las fuentes.

El modelo AERMOD es el modelo de dispersión recomendado por la EPA (Environmental Protection Agency) desde diciembre de 2006 y el principal modelo recomendado para usar en primer lugar en simulaciones de dispersión. Esta es la razón para estudiarlo a detalle en el presente capítulo y como modelo candidato a ser usado en la mayoría de aplicaciones incluyendo aquellas integradas en los sistemas de control de planta.

La Figura 4-1 muestra el diagrama de bloques del modelo AERMOD mostrando sus módulos preprocesadores.

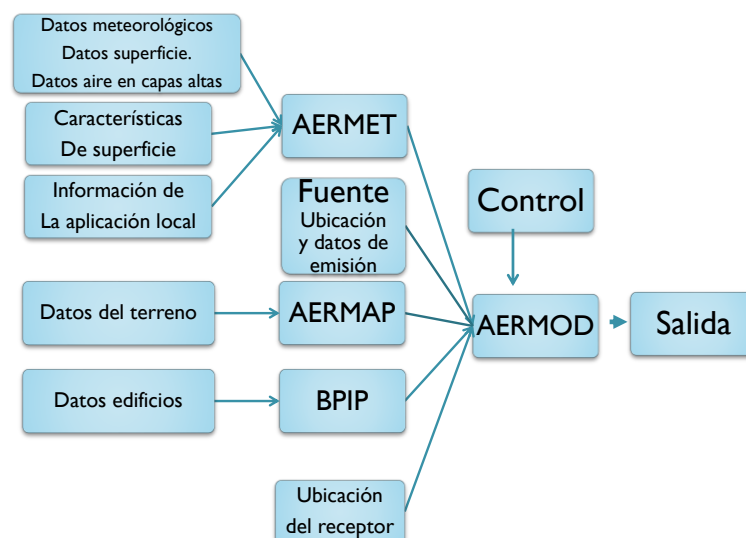


Figura 4-1 Diagrama de bloques del modelo AERMOD y pre-procesadores. [5]

4.1 MODELO AERMOD.

AERMOD es un modelo de dispersión de penacho Gaussiano en estado estacionario que incorpora la dispersión basada en la estructura y escalado de la turbulencia en las capas superiores de la atmósfera. El modelo incluye el tratamiento de fuentes de área, de volumen y puntuales en ubicaciones de terrenos complejos y simples. También incorpora los algoritmos del modelo PRIME (Plume RIse Model Enhancements) para contemplar los efectos dinámicos debidos a la presencia de edificios en las inmediaciones de las fuentes de emisión.

AERMOD simula la dispersión de los contaminantes en el aire y su deposición; realiza sus cálculos tomando en cuenta las características del terreno y la presencia de edificios cercanos a la fuente de emisión, los cuales pueden afectar la dispersión del penacho; también usa datos del clima de la capa superior atmosférica.

El modelo AERMOD incluye muchos nuevos y mejorados algoritmos comparado con los modelos de los que deriva ISC3 e ISC3.

Las principales mejoras y novedades que incorpora son los siguientes:

- Cálculo de la dispersión en las capa convectiva y en la capa de límite de estabilidad.
- Penacho en elevación y en flotación.
- Penetración de penacho en inversiones elevadas.
- Tratamiento de fuentes elevadas, cercanas a la superficie y a nivel del suelo.
- Procesado de perfiles verticales de viento, turbulencias y temperatura.
- Tratamiento de receptores en todos los tipos de terreno (desde la superficie hasta por encima de la altura del penacho y procesado de modelados de terreno complejos.
- Inclusión de algoritmos de mejorados de PRIME para cálculo de elevación de penacho y la deflexión producida por los edificios.

El modelo de dispersión AERMOD está compuesto por tres componentes principales:

- AERMIC, modelo de dispersión.
- AERMET, pre-procesador de datos meteorológicos.
- AERMAP, pre-procesador de datos de terreno.

Las principales características del modelo de dispersión AERMOD son:

- Concepto de penetración de penacho.
- Estimación de coeficientes de dispersión.
- Estimación de la elevación del penacho.
- Predicción de concentraciones en la capa convectiva.
- Predicción de concentraciones en la capa estable.
- Manejo de la deflexión producida por edificios.
- Tratamiento de terrenos simples y complejos.

AERMOD requiere dos tipos de ficheros de datos meteorológicos que genera el pre-procesador AERMET:

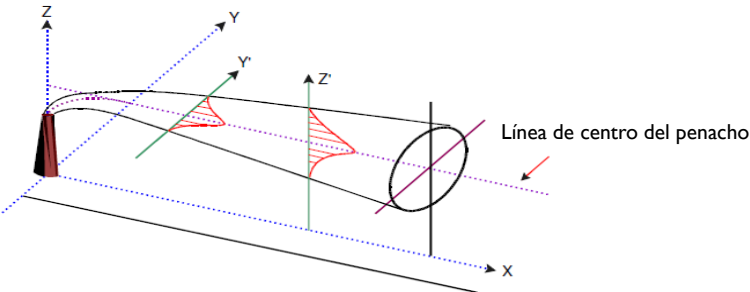
- Un fichero conteniendo parámetros escalares de la superficie.

- Un fichero conteniendo perfiles verticales.

Para aplicaciones en terrenos elevados se requieren los datos de altura del receptor y una escala de la altura de la colina. Estos datos pueden ser generados por AERMAP así como las elevaciones de todos los puntos receptores.

El modelo AERMOD se puede aplicar a todos los contaminantes primarios y liberaciones de tipo continuo de sustancias tóxicas y residuos peligrosos. La transformación química se trata como una descomposición exponencial decreciente.

La Figura 4-2 muestra un diagrama del penacho y la ecuación de advección – difusión y la Figura 4-3 muestra el flujo de procesamiento de datos previo a la ejecución de AERMOD.



$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h_s)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h_s)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

$C(x, y, z)$: Concentración, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a x metros en la dirección del viento
 Q : Flujo de emisión, $\mu\text{g}/\text{s}$
 U : Velocidad del viento a la altura de la chimenea, m/s
 σ_y, σ_z : Coeficientes de dispersión en direcciones horizontal y vertical
 y, z : Distancias vertical y horizontal desde la línea central del penacho a x metros
 h_s : Altura efectiva de la chimenea (altura de chimenea + altura del penacho)

Figura 4-2 Diagrama de penacho y ecuación de advección – difusión.

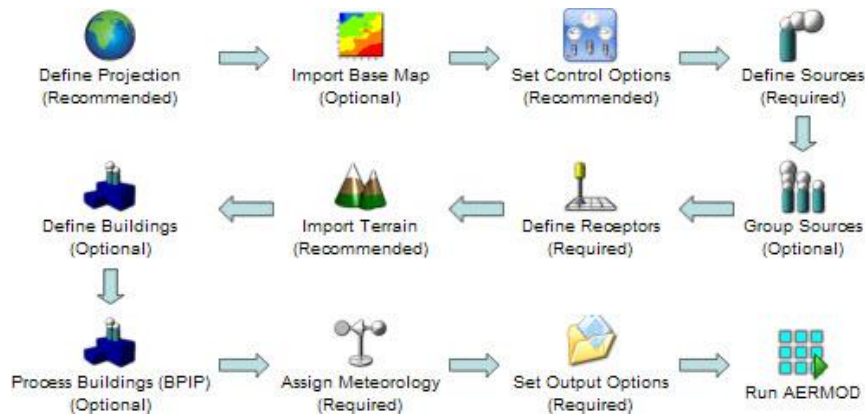


Figura 4-3 Diagrama de flujo de procesamiento de datos previos a ejecución AERMOD. [4],

[5]

4.2 PRE-PROCESADOR AERMET

El pre-procesador AERMET (AERMOD METEOROLOGICAL PREPROCESSOR) es el encargado de generar los ficheros de datos meteorológicos de superficie (*.sfc) y perfil (*.pfl) que serán utilizados por AERMOD.

AERMET requiere un conjunto de datos de entrada para procesar y generar los datos de los ficheros de salida.

Un inconveniente del pre-procesador AERMET es que muy adaptado a los datos disponibles en los Estados Unidos a través de múltiples fuentes oficiales y privadas (agencias estatales, laboratorios, observatorios, universidades, etc.), pero que no existen en otros países. Esta característica limita su uso o exige disponer de conversores de datos fuente.

La *Figura 4-4* muestra la ubicación del procesador AERMET en el proceso del modelo AERMOD.

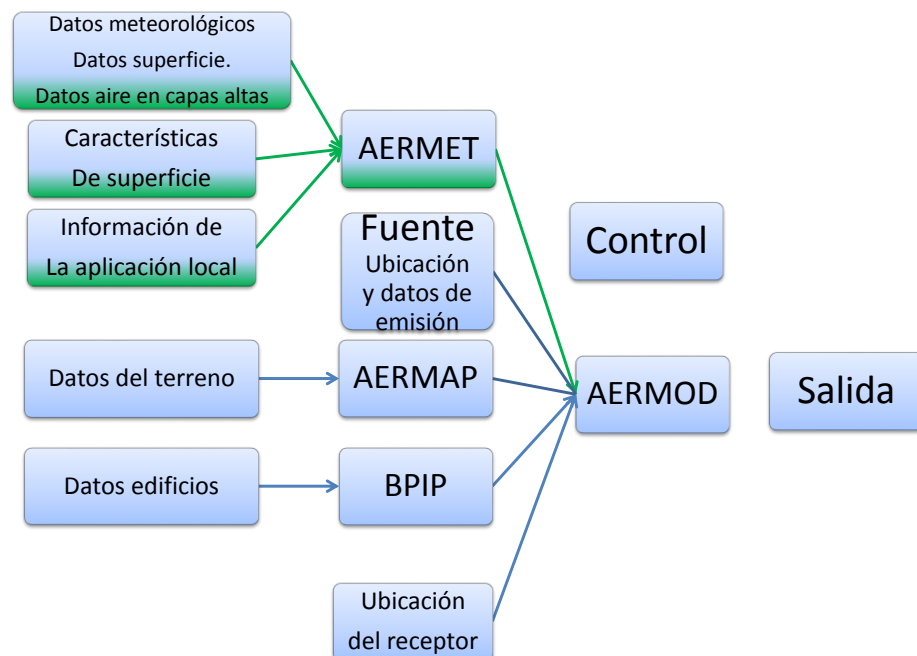


Figura 4-4 Diagrama de ubicación de AERMET en el proceso de AERMOD. [5]

El diagrama adjunto de la *Figura 4-5* muestra el diagrama de bloques del pre-procesador AERMET.

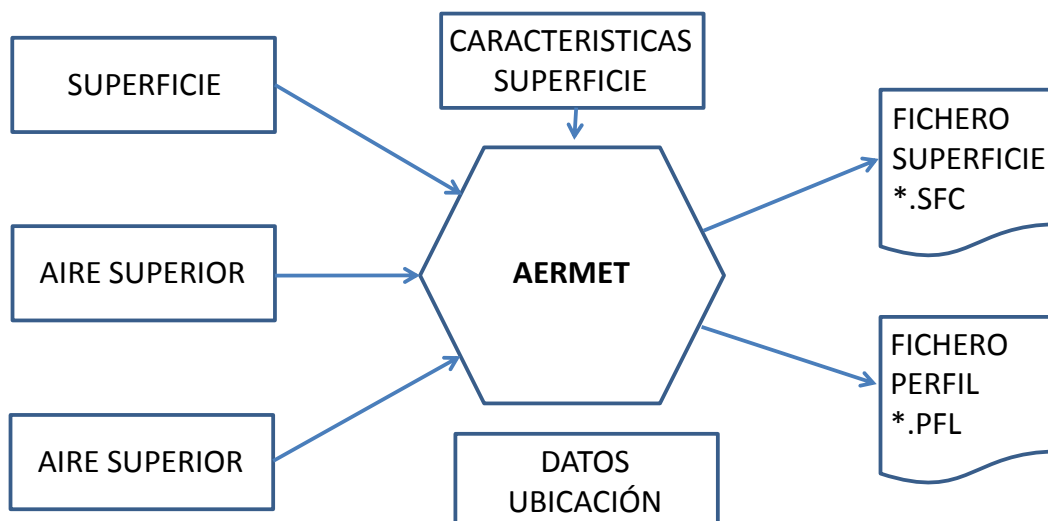


Figura 4-5 Diagrama de bloques de proceso AERMET. [5]

Los ficheros de salida del preprocesador AERMET son el fichero de superficie (*.SFC) y el fichero de perfil (*.PFL).

Estos ficheros también pueden ser generados sin utilizar el pre-procesador AERMET por otros procedimientos, por lo que a continuación se describe su formato y contenido.

4.2.1 Fichero de datos de superficie (*.SFC)

El fichero de datos de superficie (Surface data file) está compuesto por los siguientes datos:

Parámetro	Obligatorio / Opcional.	Fuente de datos: Captura Real / Simulado
Velocidad del viento (escalar en m/s) a la altura de referencia (p.e. 10 m.).	Obligatorio	Captura real en la ubicación (< 5 km.) de la fuente.
Dirección del viento (grados medidos en sentido horario al norte real) a la altura de referencia.	Obligatorio	Captura real en la ubicación (< 5 km.) de la fuente.
Temperatura ambiente (en grados Kelvin °K) a la altura de pantalla (p.e. 2 m.).	Obligatorio	Captura real en la ubicación (< 5 km.) de la fuente.
Características de la superficie en la ubicación de aplicación: <ul style="list-style-type: none"> Albedo (Proporción existente entre la 	Obligatorio	Se admite dato de simulación

energía luminosa que incide en una superficie y la que se refleja). <ul style="list-style-type: none"> • Relación o razón de Bowen. • Rugosidad del terreno (m). 		
Parámetros escalares: <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de fricción (m/s). • Escala de velocidad convectiva (m/s). • Longitud Monin-Obukhov (m). • Flujo calor sensible (W/m²). 	Obligatorio	Se admite dato de simulación
Alturas de mezcla (m) <ul style="list-style-type: none"> • Altura de la capa de mezcla (convective boundary layer) (CBL). • Altura de la capa estable límite. 	Obligatorio	Se admite dato de simulación
Gradiente vertical de temperatura potencial (°K/m).	Obligatorio	Se admite dato de simulación
Código de precipitación.	Opcional para cálculo de deposición	Captura real
Relación de precipitación (mm/hr).	Opcional para cálculo de deposición	Captura real
Presión de superficie (hPa).	Opcional para cálculo de deposición	Captura real
Humedad relativa (%).	Opcional para cálculo de deposición	Captura real
Cantidad total de nubes en 10 décimas (0-10).	Opcional para cálculo de deposición	Captura real

NOTAS:

- La cobertura de datos del fichero de datos anual debe ser superior al 90%.
- Los ficheros anuales de los últimos 5 años son necesarios para el cálculo de impacto medioambiental y para informes de análisis de riesgo.
- El fichero de datos anuales puede tener días faltantes pero no puede tener horas faltantes de un día (días completos).

4.2.2 Fichero de datos de perfil (*.PFL)

El fichero de datos perfil (Profile data) (*.pfl) contiene los siguientes campos:

Parámetro	Obligatorio / Opcional.	Fuente de datos: Captura Real / Simulado
Altura de medida para cada nivel (m).	Obligatorio	Captura real
Dirección del viento en el nivel actual (grados medidos en sentido horario desde el norte real).	Obligatorio	Captura real
Velocidad del viento en el nivel actual (m/s).	Obligatorio	Captura real
Temperatura en el nivel actual (°C).	Obligatorio	Captura real
Sigma-theta (desviación standard de la fluctuación de la dirección del viento en horizontal) en el nivel actual) (grados °).	Opcional (valor por defecto en su defecto)	Captura real
Sigma-W (desviación standard de la fluctuación de la dirección del viento en vertical) (m/s).	Opcional (valor por defecto en su defecto)	Captura real

Nota: Los parámetros aunque se indican que debe proceder de captura real puede aceptarse que en algunos casos provengan de simulaciones.

4.2.3 Formato de fichero datos superficie (*.sfc)

A continuación se adjunta el formato del fichero de datos de superficie (*.sfc):

Format::3(I2,1X),I3,1X,I2,1X,F6.1,1X,3(F6.3,1X),2(F5.0,1X),F8.1,1X,F6.3,1X,2F(6.2,1X),F7.2,1X,F5.0,3(1X,F6.1)

Donde,

Año, Mes, Día, Día Juliano, Hora y a continuación:

1. Flujo de calor sensible (Sensible heat flux)
2. Velocidad de fricción de la superficie (Surface friction velocity) (Ustar)
3. Escala de velocidad convectiva (Convective velocity scale) (Wstar)
4. Gradiente de potencial de temperatura vertical por encima de la capa límite de la atmósfera o capa límite planetaria Vertical potential temperature gradient above PBL) (VPTG)
5. Altura de la mezcla convectiva (capa límite de la atmósfera) Convective mixing height (PBL)
6. Altura de mezcla mecánica en la capa límite estable Mechanical mixing height (SBL)
7. Longitud de Monin-Obukhov Monin-Obukhovlength(MOL)
8. Rugosidad de la superficie Surface roughness(Z0)
9. Relación o razón Bowen Bowen ratio (BRatio)

10. Albedo
11. Velocidad del viento Wind speed (WS)
12. Dirección del viento Wind direction (WD)
13. Altura de referencia del viento Reference height for winds (WRef=10m)
14. Temperatura de superficie Surface temperature (KTEMP)
15. Altura de referencia para la temperatura de superficie Reference height for surface temperature (TRef=2m)
16. Código de precipitación Precipitation code
17. Flujo de precipitación Precipitation rate (RPPTN)
18. Humedad relativa Relative humidity (RH)

4.2.4 Formato de fichero de perfil (*.pfl)

A continuación se adjunta el formato del fichero de datos de perfil (*.pfl):

Año, Mes, Día, Hora, Altura, Top, WDnn, WSnn, TTnn, SAnn, SWnn
 FORMAT (4(I2,1X), F6.1,1X, I1,1X, F5.0,1X, F7.2,1X, F7.1, 1X,F6.1, 1X,F7.2)

Donde,

Altura = altura de la medida (m)
 Top = 1 si es el valor más alto de la hora y 0 en caso contrario
 WDnn = Dirección del viento en el nivel actual (grados)
 WSnn = Velocidad del viento en el nivel actual (m/s)
 TTnn = Temperatura en el nivel actual (°C)
 SAnn = Sigmatheta (grados)
 SWnn = SigmaW (m/s)

4.2.5 Ejemplo de fichero de datos de superficie (*.SFC)

```
33.950N 83.317W UA_ID: 99999 SF_ID: 00001 OS_ID: 0 VERSION: 06341
8 1 1 1 1 -999.0 -9.000 -9.000 -9.000 -999. -999. -99999.0 0.334 1.50 1.00 0.00 0.
10.0 306.6 2.0 0 0.00 999. 1008. 7
8 1 1 1 2 -999.0 -9.000 -9.000 -9.000 -999. -999. -99999.0 0.334 1.50 1.00 0.00 0.
10.0 306.6 2.0 0 0.00 999. 1008. 7
8 1 1 1 3 -9.0 0.115 -9.000 -9.000 -999. 90. 15.2 0.001 1.50 1.00 3.60 354. 10.0
305.6 2.0 0 0.00 999. 1008. 7
8 1 1 1 4 -999.0 -9.000 -9.000 -9.000 -999. -999. -99999.0 0.334 1.50 1.00 0.00 0.
10.0 304.8 2.0 0 0.00 999. 1008. 5
8 1 1 1 5 -9.4 0.103 -9.000 -9.000 -999. 76. 10.4 0.001 1.50 1.00 3.60 13. 10.0 304.4
2.0 0 0.00 999. 1008. 5
8 1 1 1 6 -1.3 0.033 -9.000 -9.000 -999. 16. 2.4 0.001 1.50 1.00 1.50 342. 10.0 303.6
2.0 0 0.00 999. 1008. 5
8 1 1 1 7 -0.5 0.022 -9.000 -9.000 -999. 7. 1.7 0.001 1.50 1.00 1.00 315. 10.0 302.4
2.0 0 0.00 999. 1009. 7
8 1 1 1 8 -0.5 0.022 -9.000 -9.000 -999. 7. 1.7 0.001 1.50 1.00 1.00 313. 10.0 300.6
2.0 0 0.00 999. 1009. 7
8 1 1 1 9 9.7 0.124 -9.000 -9.000 -999. 101. -17.8 0.001 1.50 0.46 2.60 17. 10.0
302.5 2.0 0 0.00 999. 1009. 7
8 1 1 1 10 57.2 -9.000 -9.000 -9.000 -999. -999. -99999.0 0.334 1.50 0.35 0.00 0.
10.0 305.5 2.0 0 0.00 999. 1010. 1
8 1 1 1 11 117.9 0.229 -9.000 -9.000 -999. 251. -9.1 0.001 1.50 0.25 4.60 4. 10.0
308.2 2.0 0 0.00 999. 1010. 1
8 1 1 1 12 154.0 0.278 -9.000 -9.000 -999. 337. -12.5 0.001 1.50 0.23 5.70 326. 10.0
310.9 2.0 0 0.00 999. 1010. 1
8 1 1 1 13 168.1 0.321 -9.000 -9.000 -999. 417. -17.6 0.001 1.50 0.22 6.70 323. 10.0
311.9 2.0 0 0.00 999. 1009. 1
8 1 1 1 14 160.5 0.253 -9.000 -9.000 -999. 295. -9.1 0.001 1.50 0.23 5.10 339. 10.0
312.4 2.0 0 0.00 999. 1009. 1
```


4.2.6 Ejemplo de fichero de perfil (*.PFL)

```

8 1 1 1 10.0 1 0.0 0.00 33.50 99.00 99.00
8 1 1 2 10.0 1 0.0 0.00 33.50 99.00 99.00
8 1 1 3 10.0 1 350.0 3.60 32.50 99.00 99.00
8 1 1 4 10.0 1 0.0 0.00 31.60 99.00 99.00
8 1 1 5 10.0 1 10.0 3.60 31.30 99.00 99.00
8 1 1 6 10.0 1 340.0 1.50 30.50 99.00 99.00
8 1 1 7 10.0 1 310.0 1.00 29.30 99.00 99.00
8 1 1 8 10.0 1 310.0 1.00 27.50 99.00 99.00
8 1 1 9 10.0 1 20.0 2.60 29.40 99.00 99.00
8 1 1 10 10.0 1 0.0 0.00 32.40 99.00 99.00
8 1 1 11 10.0 1 360.0 4.60 35.10 99.00 99.00
8 1 1 12 10.0 1 330.0 5.70 37.70 99.00 99.00
8 1 1 13 10.0 1 320.0 6.70 38.80 99.00 99.00
8 1 1 14 10.0 1 340.0 5.10 39.30 99.00 99.00
8 1 1 15 10.0 1 230.0 2.60 34.90 99.00 99.00
8 1 1 16 10.0 1 190.0 5.70 26.60 99.00 99.00
8 1 1 17 10.0 1 190.0 5.70 25.30 99.00 99.00
8 1 1 18 10.0 1 200.0 6.20 24.10 99.00 99.00
8 1 1 19 10.0 1 200.0 5.70 23.30 99.00 99.00
8 1 1 20 10.0 1 210.0 5.10 23.10 99.00 99.00
8 1 1 21 10.0 1 200.0 4.10 22.00 99.00 99.00
8 1 1 22 10.0 1 200.0 4.60 20.30 99.00 99.00
8 1 1 23 10.0 1 200.0 3.60 19.70 99.00 99.00
8 1 1 24 10.0 1 200.0 3.10 19.30 99.00 99.00

```

[46]

4.3 PRE-PROCESADOR AERSURFACE

El pre-procesador AERSURFACE es una herramienta que produce datos característicos de la superficie para utilizar con AERMOD.

Los datos generados por AERSURFACE son:

- Albedo.
- Relación o razón de Bowen.
- Rugosidad de la superficie.

AERSURFACE provee datos de Albedo, razón de Bowen y rugosidad de la superficie en los sectores alrededor del punto de emisión, dividiendo en sectores circulares (de 12 a 30) con varios radios (p.e. 1 km, 3 km y 5 km).

La *Figura 4-6* muestra el cálculo de parámetros con AERSURFACE a partir de ficheros con formato NLCD92.

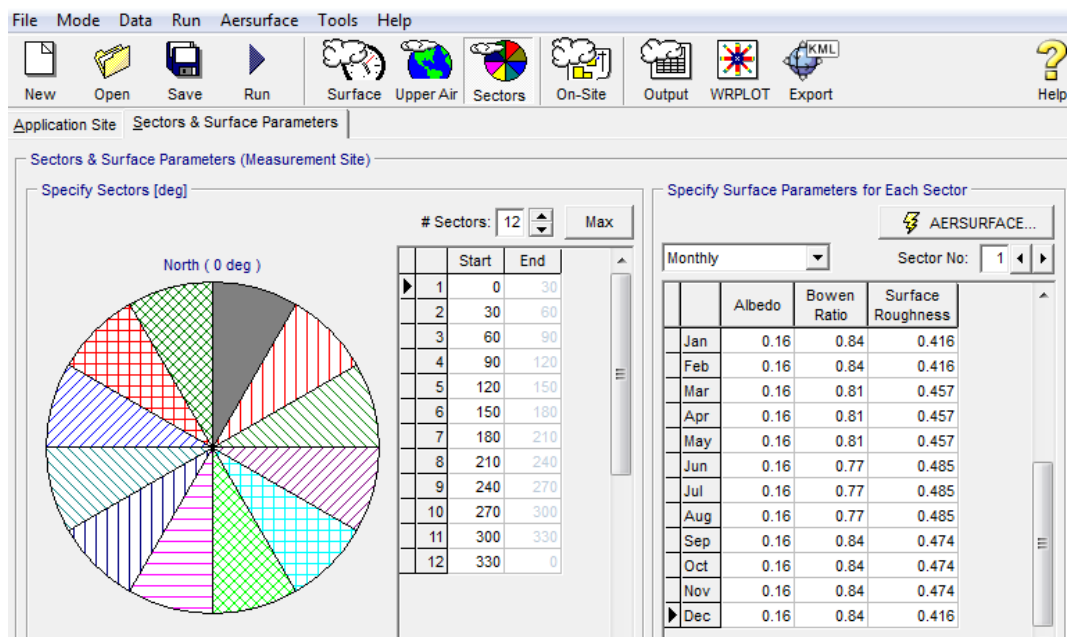


Figura 4-6 Cálculo de parámetros de superficie con AERSURFACE a partir de ficheros con formato NLCD92. [5]

El procesador final MAKEGEO lee los datos de cada fracción de terreno, los datos de usuario en los que define la categoría de cada sector, los valores relativos al uso de la superficie y opcionalmente los datos del terreno estructurados en rejilla para producir el fichero GEO.DAT listo para ser utilizado con CALMET.

El fichero GEO.DAT contiene los siguientes datos geofísicos formateados:

- Uso del terreno.
- Elevación.
- Características de la superficie.
- Flujos de calor creados por el hombre.

A continuación se muestra un fichero de ejemplo GEO.DAT:

```
GEO.DAT          2.0          Header structure with coordinate parameters
2 Produced by MAKEGEO Version: 2.26 Level: 041230
Demo Application                                     UTM
16N    NAS-C    02-21-2003

10      10      -54.000   -621.000      54.000      54.000 KM M      0      -
LAND USE DATA -- 0=default lu categories, 1=new categories

40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40
40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40
40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40
40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40
40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40

1.0          - TERRAIN HEIGHTS - HTFAC - conversion to meters      185.078
147.205      146.924      156.446      139.487      138.010      173.812
203.405      232.758      222.710      221.813      144.507      142.191
136.302      123.083      133.693      158.348      192.281      224.074
247.634      316.083      189.884      139.814      144.073      122.189
123.002      146.333      195.571      215.208      263.082      253.774
157.182      121.245      121.407      137.051      144.876      152.340
200.471      246.724      318.109      182.808      98.6778      91.7038
129.091      138.407      165.023      190.390      225.489      253.910
```

314.988	114.193	77.9254	93.2705	115.583	141.910
190.386	187.382	204.256	306.503	448.922	78.3998
71.2785	95.3602	129.989	148.870	208.477	227.053
260.169	393.913	421.927	64.1938	79.1642	117.264
139.864	158.785	253.950	254.195	324.301	434.496
277.916	53.5650	84.5807	134.072	148.030	162.781
185.386	203.171	281.656	288.990	312.717	42.8075
71.3265	111.239	96.0823	122.349	189.143	181.916
249.689	271.627	278.849	0		

```

- z0 --(0=default z0-lu table, 1=new z0-lu table, 2=gridded z0 field 0
- albedo --(0=default albedo-lu table,1=new albedo-lu table,2=gridded albedo field 0
- Bowen ratio --(0=default Bowen-lu table,1=new Bowen-lu table,2=gridded Bowen field 0
- soil heat flux param (HCG) --(0=default HCG-lu table,1=new HCG-lu table,2=gridded field 0
- anthropogenic heat flux (QF) --(0=default QF-lu table,1=new QF-lu table,2=gridded field 0
- leaf area index (XLAI) --(0=default XLAI-lu table,1=new XLAI-lu table,2=gridded field

```

4.3.1 Ejemplo de fichero de salida de AERSURFACE

```

Mean Albedo = 0.10
Mean Bowen ratio = 0.92
Mean Roughness (m) = 0.8308
Albedo Bowen Rough
sector 01 = 000 to 030 = 0.11 0.89 0.7122
sector 02 = 030 to 060 = 0.10 0.97 0.9448
sector 03 = 060 to 090 = 0.10 0.94 0.9267
sector 04 = 090 to 120 = 0.11 0.89 0.7482
sector 05 = 120 to 150 = 0.11 0.94 0.7436
sector 06 = 150 to 180 = 0.10 0.99 0.9336
sector 07 = 180 to 210 = 0.10 0.99 0.9313
sector 08 = 210 to 240 = 0.10 0.97 0.8699
sector 09 = 240 to 270 = 0.10 0.97 0.8888
sector 10 = 270 to 300 = 0.10 0.94 0.8399
sector 11 = 300 to 330 = 0.10 0.97 0.9241
sector 12 = 330 to 360 = 0.11 0.58 0.5064
FREQ_SECT ANNUAL 12
SECTOR 01 000 030
SECTOR 02 030 060
SECTOR 03 060 090
SECTOR 04 090 120
SECTOR 05 120 150
SECTOR 06 150 180
SECTOR 07 180 210
SECTOR 08 210 240
SECTOR 09 240 270
SECTOR 10 270 300
SECTOR 11 300 330
SECTOR 12 330 360
SITE_CHAR 1 01 0.11 0.89 0.7122
SITE_CHAR 1 02 0.10 0.97 0.9448
SITE_CHAR 1 03 0.10 0.94 0.9267
SITE_CHAR 1 04 0.11 0.89 0.7482
SITE_CHAR 1 05 0.11 0.94 0.7436
SITE_CHAR 1 06 0.10 0.99 0.9336
SITE_CHAR 1 07 0.10 0.99 0.9313

```

```

SITE_CHAR 1 08 0.10 0.97 0.8699
SITE_CHAR 1 09 0.10 0.97 0.8888
SITE_CHAR 1 10 0.10 0.94 0.8399
SITE_CHAR 1 11 0.10 0.97 0.9241
SITE_CHAR 1 12 0.11 0.58 0.5064

```

4.4 PRE-PROCESADOR AERMAP

El pre-procesador AERMAP (AERMOD Terrain Preprocessor) calcula elevaciones y factores de escala de la altura de las colinas para los receptores y elevaciones para las fuentes, edificios y depósitos.

La Figura 4-7 muestra la ubicación del procesador AERMAP en el proceso de AERMOD.

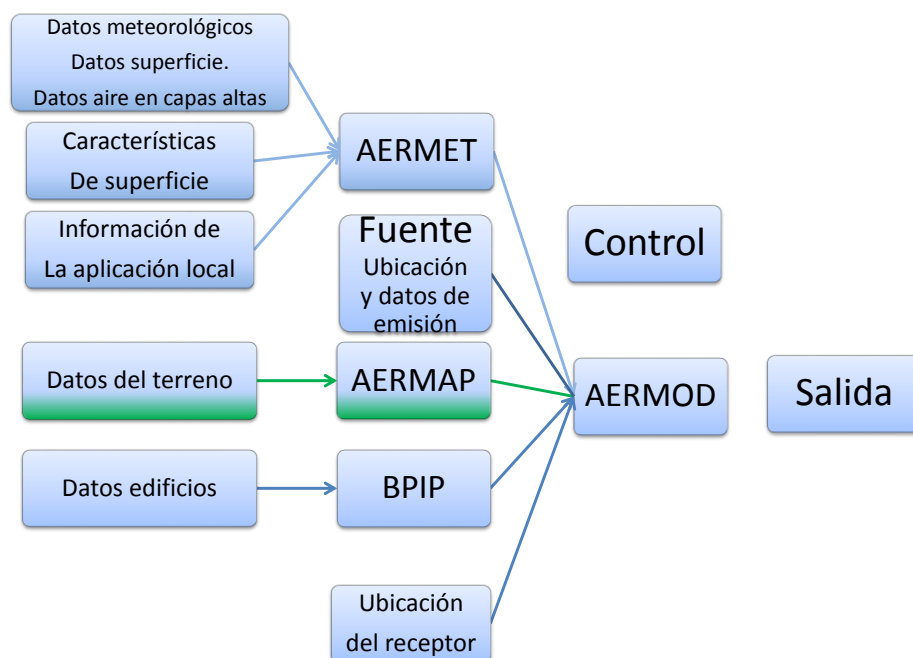


Figura 4-7 Diagrama de ubicación de AERMAP en el proceso de AERMOD. [5], [25]

AERMAP utiliza los factores de escala de la altura de las colinas para determinar si el penacho impacta contra el terreno o si el penacho sigue al terreno.

AERMAP calcula las elevaciones a partir de ubicación de los objetos en coordenadas UTM. El primer paso es por tanto definir la posición de los objetos.

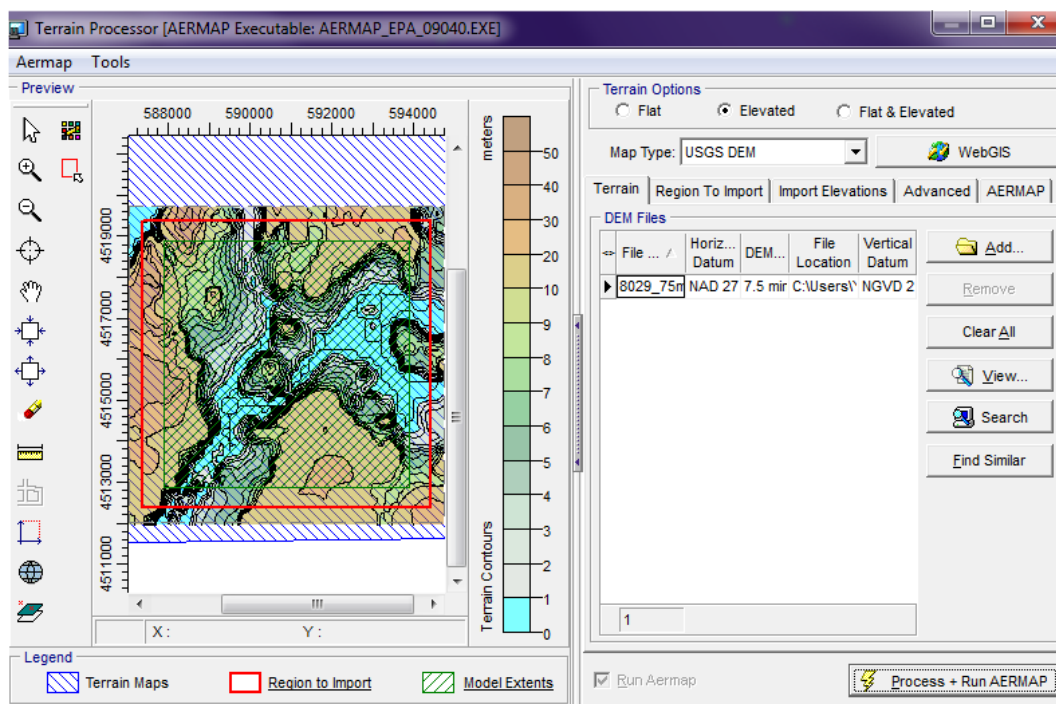


Figura 4-8 Ejemplo de ejecución del pre-procesador AERMAP. [5], [25]

4.5 PRE-PROCESADOR BPIP-PRIME

El pre-procesador BPIP-PRIME o BPIP-PRM se utiliza en la preparación de datos para la ejecución de AERMOD.

BPIP-PRIME está derivado del pre-procesador BPIP utilizado anteriormente para la ejecución de ISC3.

El pre-procesador BPIP (Building Profile Input Program) es un programa de ordenador diseñado para incorporar los conceptos y procedimientos contenidos en el documento de soporte a las buenas prácticas de ingeniería (Good Engineering Practice) (GEP), la guía de deflexión generada por edificios y otras referencias relativas al cálculo de alturas de edificios y al cálculo de anchuras proyectadas para edificios simples, edificios multinivel y grupos o estructuras.

El instituto para la investigación de la energía eléctrica (Electric Power Research Institute) (EPRI) ha sido el impulsor y patrocinador del estudio necesario para desarrollar un nuevo y mejorado algoritmo para modelar la elevación del penacho integrando la deflexión producida por edificios.

El modelo PRIME (Plume Rise Model Enhancements) se ha diseñado para incorporar dos características fundamentales asociadas con la deflexión producida por edificios:

- La mejora en los coeficientes de la dispersión del penacho debido a la estela turbulenta.
- La reducción de la elevación del penacho debido a la combinación de los flujos descendentes en la esquina del edificio y al incremento de la mezcla en la estela.

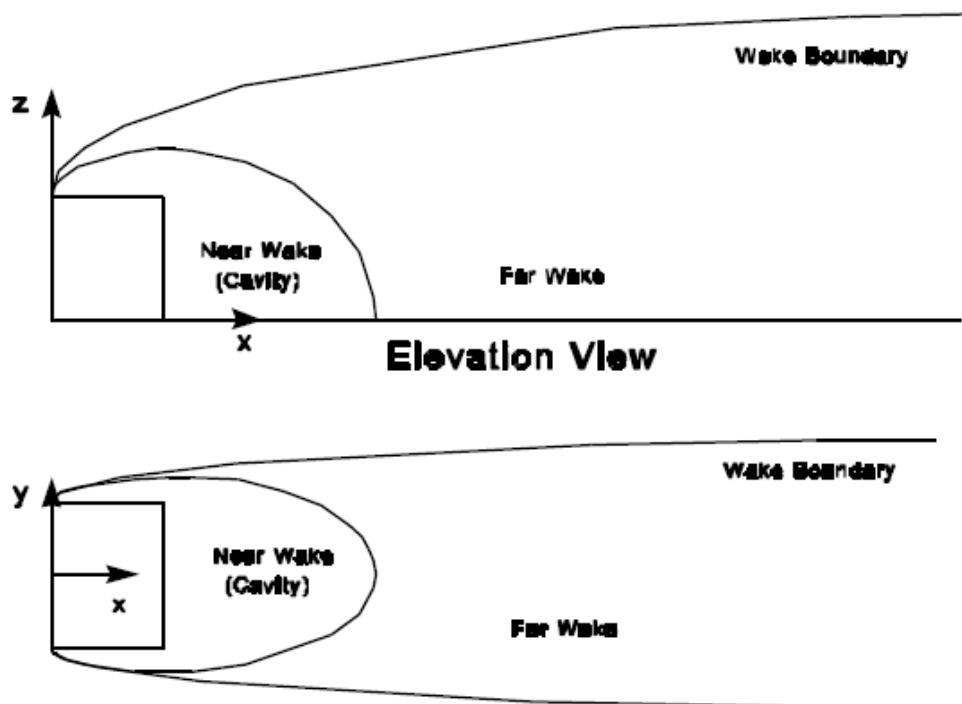


Figura 4-9 Diagrama de la estela detrás de un edificio. [5] [47]

4.5.1 Elevación del penacho

La elevación de penacho PRIME se calcula como una solución numérica de la masa y las leyes de conservación del momento y la energía. El modelo permite la estratificación de la temperatura arbitraria, corte de viento unidireccional arbitrario y tamaño arbitrario derivado del tamaño inicial. Incluye pérdidas de calor radioactivo y opcionalmente un modo que no aplica la aproximación Boussinesq (non-Boussinesq)¹.

La implementación de la elevación del penacho en PRIME permite considerar los efectos de las corrientes de flujo ascendentes y descendientes y también la dilución mejorada debido a las turbulencias inducidas por los edificios. Una característica clave del modelo es la capacidad para incluir el efecto de cizalladura vertical del viento los cuales son muy importantes para muchas liberaciones flotantes de chimeneas bajas. Este efecto del déficit del viento inducido por el edificio, se modifica en función de la distancia al edificio en la dirección del viento y produce una elevación de penacho.

¹ En flujos inducidos por convección natural, en los que el movimiento del fluido es originado por efectos de flotación debidos a diferencias de densidad en el seno del fluido, a su vez producidas por variaciones de temperatura, la aproximación de Boussinesq supone constante la densidad del fluido excepto en el término gravitatorio de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. [78]

4.5.2 Coeficientes de dispersión

La intensidad de la turbulencia y los valores de velocidad se calculan dentro de la región de la estela. Estos valores son máximos en el muro frontal del edificio y decaen a dos tercios en la dirección del viento. En un penacho liberado en contra del viento, inicialmente la estela crece con el factor de ambiente, pero en el punto que el penacho corta la estela, la función densidad de probabilidad se utiliza para calcular la dispersión del penacho sobre la longitud de la estela y el modelo de difusión de Eddy más allá del crecimiento del penacho.

Cuando la intensidad de la turbulencia dentro de la estela decrece hasta el nivel de ambiente, se utiliza una técnica de fuente virtual para convertirla en una curva de dispersión. En la capa convectiva límite o si el penacho es interceptado por la estela en la altura de los edificios en la dirección del viento, los efectos de los edificios en la dispersión del penacho puede ser pequeña o de efecto reducido. Cerca del edificio o con flujos neutrales y estables los efectos de los edificios serán mayores. Ambos coeficientes de dispersión, verticales y horizontales, se incrementarán dentro de la estela del edificio.

4.5.3 Concentraciones cercanas y lejanas de la estela.

La concentración de la estela cercana es uniforme en el plano x-z y con una distribución Gaussiana a través del flujo. La masa para esta concentración resulta de la captura y recirculación de la estela cercana o una pequeña fracción de la elevación del penacho primario. Usando las ecuaciones para la altura y la anchura de la estela cercana límite, las fracciones de la distribución del penacho vertical (f_Z) y la distribución del penacho horizontal (f_Y) se calculan a muchas distancias a lo largo de la longitud de la estela cercana. La fracción capturada se estima como el máximo del producto $f_Z \cdot f_Y$. El valor de f_Z se limita a la fracción del penacho que queda por debajo de la altura del edificio y al final de la estela cercana para permitir que penachos ligeros o flotantes se escapen parcial o totalmente.

La masa del penacho capturado en la estela cercana se vuelve a emitir a la estela lejana como una fuente de volumen a nivel del suelo. La fuente de volumen se ubica en la base del muro en contra del viento del edificio pero solamente se evalúa cerca del final de la estela cercana y más allá de la misma. Su s_y inicial es proporcional a la anchura proyectada del edificio y la s_z inicial es calculada combinando el pico de concentración en la estela cercana y el flujo de conservación de la masa. La porción de la elevación del penacho primario que no es capturada por la estela cercana se modela complementariamente como el flujo de masa reducido.

La *Figura 4-10* muestra detalles de cómo configurar un nuevo edificio y la *Figura 4-11* muestra como configurar un edificio y una chimenea para un caso de prueba.

La *Figura 4-12* muestra un diagrama de la estructura de influencia de un edificio según la dirección del viento.

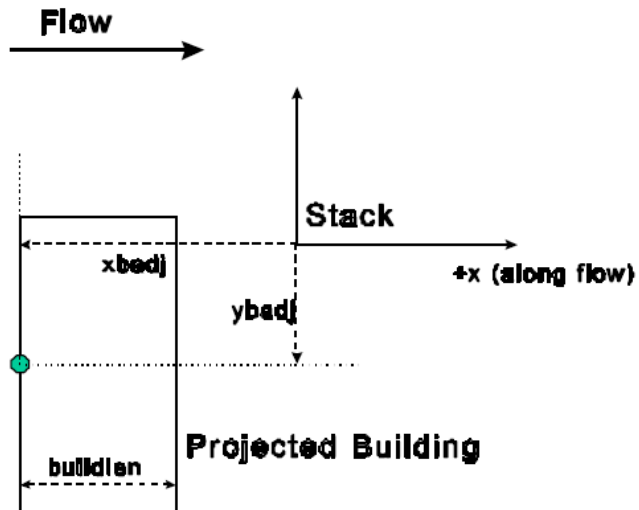


Figura 4-10 Esquema de identificación de un nuevo edificio para PRIME. [5] [47]

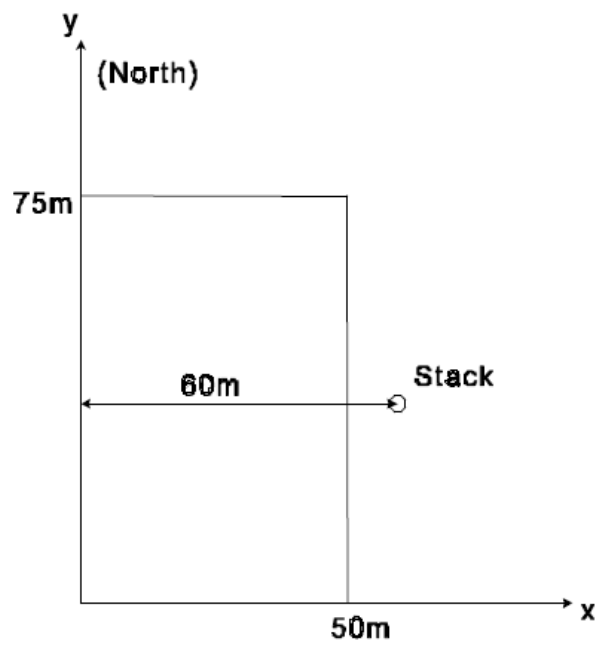


Figura 4-11 Esquema de cómo configurar un edificio y chimenea para ejecutar un caso de prueba. [5] [47]



Structure Influence Zone (SIZ)

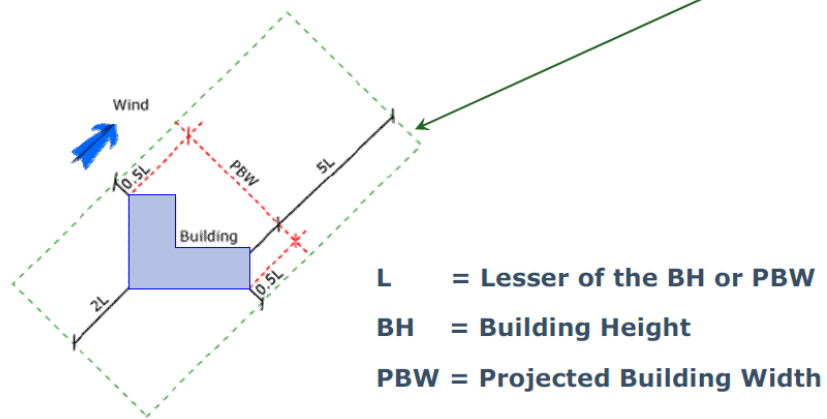


Figura 4-12 Diagrama de la estructura de influencia de un edificio según la dirección del viento. [48]

4.6 MODELO AERSCREEN

El modelo AERSCREEN es un modelo simplificado de AERMOD que permite realizar simulaciones de diagnóstico o previas (cribado) a una posible ejecución posterior de AERMOD.

AERSCREEN utiliza MAKEMET y ejecuta AERMOD en “modo cribado” para una sola fuente. Utiliza los pre-procesadores MAKEMET, BPIPPRM y AERMAP para generar las entradas necesarias al modelo.

AERSCREEN utiliza AERMAP para procesar terrenos complejos:

- No se procesa terreno en fuentes de áreas rectangulares.
- Utilizar PRIME para calcular las turbulencias producidas por edificios.
- Especifica la ubicación de la chimenea y la dirección relativa al centro del edificio.
- Especifica dimensiones de los edificios (altura y dimensiones horizontales).
- Dirección de la dimensión más larga del edificio desde el norte.
- No usado para fuentes de área o fuentes de volumen.

AERSCREEN utiliza BPIPPRM:

- Sin deposición.
- Utiliza MAKEMET para el cálculo de meteorología.
- Especifica temperaturas mínimas y máximas, mínima velocidad del viento, altura del anemómetro y características de la superficie.
- Matrices internas de otros parámetros meteorológicos.

El usuario puede especificar:

- Distancia de prueba para el procesado del terreno.
- 5 km de distancia por defecto para terreno llano (con o sin turbulencias de edificios) o fuentes de área rectangulares.
- Receptores en mástiles.
- Elevación de la ubicación de la fuente para PROFBASE (incluso en terreno llano).

Elevación sobre el nivel del mar para potencial perfil de temperatura:

- Rural o urbana (en caso de urbana, población urbana).
- Distancia al aire libre (distancia a la línea de cerca).
- Ubicación de la fuente en coordenadas geográficas o UTM.
- Rutina para localizar el caso peor.
- Fichero de salida RANKFILE en AERMOD.
- Concentración, fecha, dirección, distancia y meteorología.

Rutina para encontrar máxima concentración para distancias a receptores automáticos:

- Reutilizando ficheros de AERMOD de ejecuciones anteriores.

- Realizando comprobación de errores en ficheros de salida de AERMOD y AERMAP y generando fichero log de la ejecución de AERSCREEN.
- Incluye factores para 3 horas, 8 horas, 24 horas y medias anuales.

4.7 PREPROCESADOR MAKEMET

El pre-procesador MAKEMET permite procesar varios parámetros meteorológicos para generar los ficheros requeridos por AERMOD.

MAKEMET procesa y genera los siguientes parámetros meteorológicos:

- -Velocidad del viento (estable y convectiva).
- Índice de nubosidad (estable y convectiva).
- Temperatura ambiente máxima y mínima (estable y convectiva).
- Ángulo de elevación solar (estable y convectiva).
- Escala de velocidad convectiva (w^*) (solo convectiva).
- Alturas de mezclas mecánicas (solo estable).

Utiliza las subrutinas de AERMET para calcular u^* y L y también calcula las altura de mezcla convectivas.

Genera los ficheros de superficie y de perfil para ejecutar AERMOD en modo autónomo o standalone.

5 AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, mostraremos una visión panorámica de la automatización y control industrial. Bajo la denominación de automatización y control industrial nos referimos al conjunto de elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos e informáticos que permiten la monitorización y control una planta industrial en lo referente en general a sus procesos operativos y en particular a los procesos productivos, logísticos y procesos auxiliares.

Obviamente la automatización de cualquier proceso depende en gran medida de sus características, naturaleza, dinámica, etc. pero con cierto nivel de abstracción, la automatización industrial presenta ciertas características comunes y/o habituales en su arquitectura y estructura.

La *Figura 5-1* adjunta muestra un esquema genérico y general de un esquema de automatización con seis capas que abarcan desde el campo (sensores e instrumentación) hasta los sistemas centrales de la compañía que normalmente se concentran en un sistema ERP (Enterprise Resource Planning).

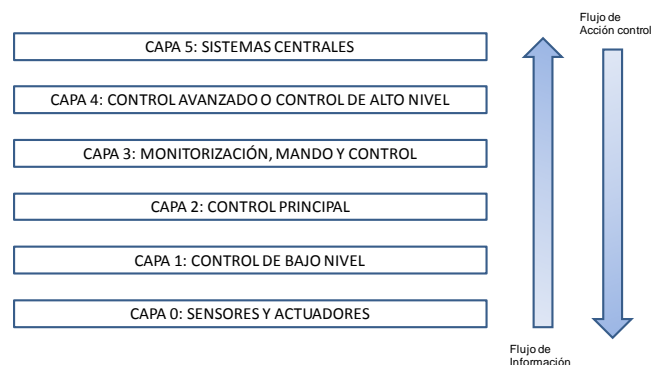


Figura 5-1 Esquema de automatización en seis capas. [6]

La Figura 5-2 muestra un diagrama general de los elementos que componen lo que denominamos “automatización industrial”.

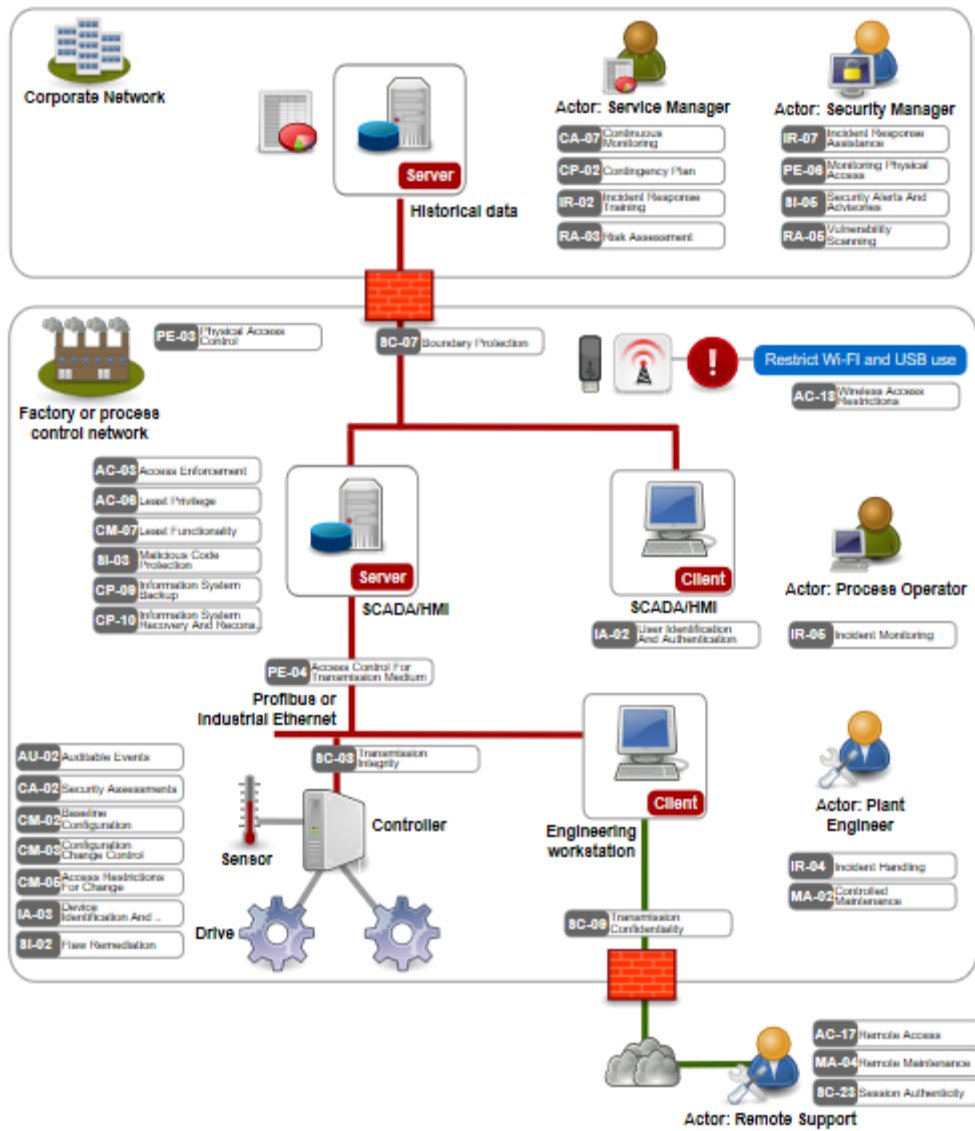


Figura 5-2 Diagrama general de automatización. [49]

La Figura 5-3 muestra un diagrama de control de planta desde el punto de vista de seguridad de la información y la infraestructura de comunicaciones.

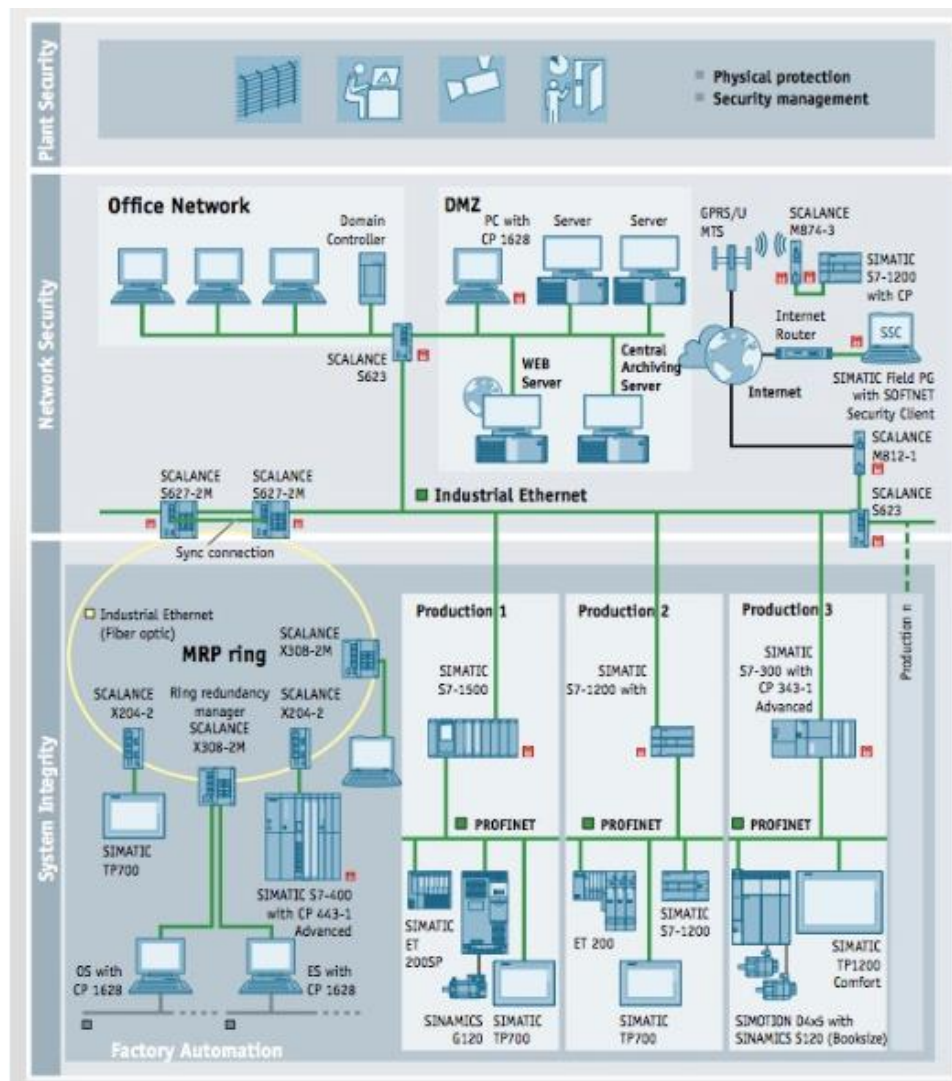


Figura 5-3 Diagrama de control de planta desde el punto de vista de seguridad. [50]

En ocasiones en instalaciones menos complejas o con menor grado de automatización integral debido a su naturaleza o circunstancias el esquema de seis capas se reduce a un esquema de cuatro capas, tal como se muestra en la *Figura 5-4* adjunta, aunque con idéntica estructura a la de seis capas.

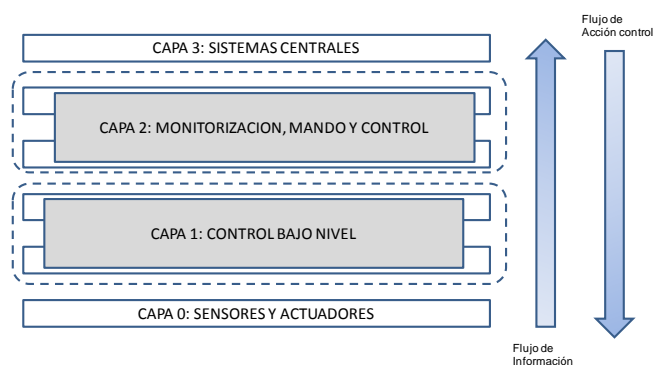


Figura 5-4 Esquema de automatización en cuatro capas. [6]

En plantas con funcionamiento autónomo o en industrias sin centralización de automatización, el esquema se simplifica aún más, siendo habitual un esquema de automatización de tres capas tal y como se muestra en la *Figura 5-5* adjunta.

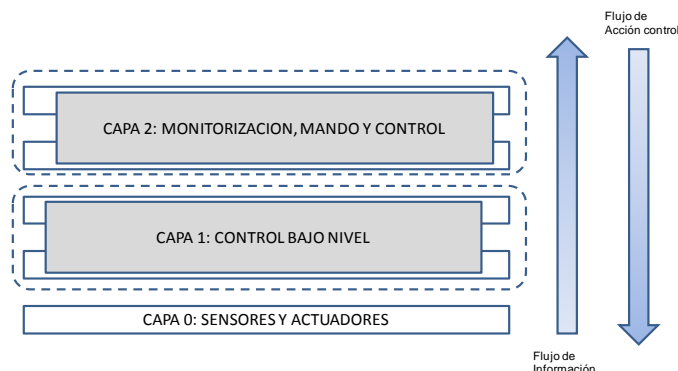


Figura 5-5 Esquema de automatización en tres capas. [6]

5.2 CAPA 0: SENSORES Y ACTUADORES

La capa 0 está constituida por los sensores y actuadores que permiten obtener las medidas de magnitudes físicas y actuar sobre las máquinas o dispositivos.

Los sensores y actuadores disponen de una interface eléctrica/electrónica que posibilita su conexión cableada o inalámbrica con el controlador ubicado en la capa 1 (control de bajo nivel). Existen múltiples tipos de interface eléctrica/electrónica dependiendo de la naturaleza y tipo de sensor, de la cantidad de datos que provee, de si requiere ser comandado, etc.

En la tabla adjunta (*Figura 5-6*) se muestra un resumen de las interfaces eléctricas/electrónicas más habituales en sensores.

TIPO DE INTERFACE	EJEMPLOS DE SENSORES
Analógica, voltaje DC 0-5 V, ± 5 V. 0-10 V	Sensores de temperatura, sensores de presión, etc. Actuadores de regulación (antiguos).
Analógica, corriente mA ± 50 mV, ± 100 mV	Células de carga y sensores basados en bandas extensiométricas.
Analógica, corriente mA 0-20 mA, 4-20 mA	Sensores simples en general. Actuadores de regulación (antiguos).
Digital, discreta, salidas por contacto libre de potencial y entrada opto acoplada. (0-10 V, 0-5 V, ± 5 V)	Presostatos, sensores de nivel, sensores de proximidad, etc. Electroválvulas y actuadores simples en general.

Digital con protocolo RS-232, RS-485, MODBUS, PROFIBUS, etc.	Analizadores, módulos de múltiples sensores, estaciones meteorológicas, etc. Arrancadores, reguladores y actuadores complejos en general.
---	---

Figura 5-6 Tabla resumen de interfaces eléctricas/electrónicas de sensores. [6]

El cableado y los elementos de conexión tanto de cableado (repartidores, canalizaciones, etc.) como inalámbricos (antenas, mástiles, etc.) también pertenecen a esta capa.

Actualmente existe una fuerte sinergia de elementos para la capa 0, derivada del auge de elementos discretos (sensores, actuadores, visualizadores, etc.), todos ellos dotados de capacidad de comunicaciones en lo que se conoce como IoT (Internet of Things).

En la Figura 5-7 se muestra un diagrama de adaptación de interfaces de sensores.

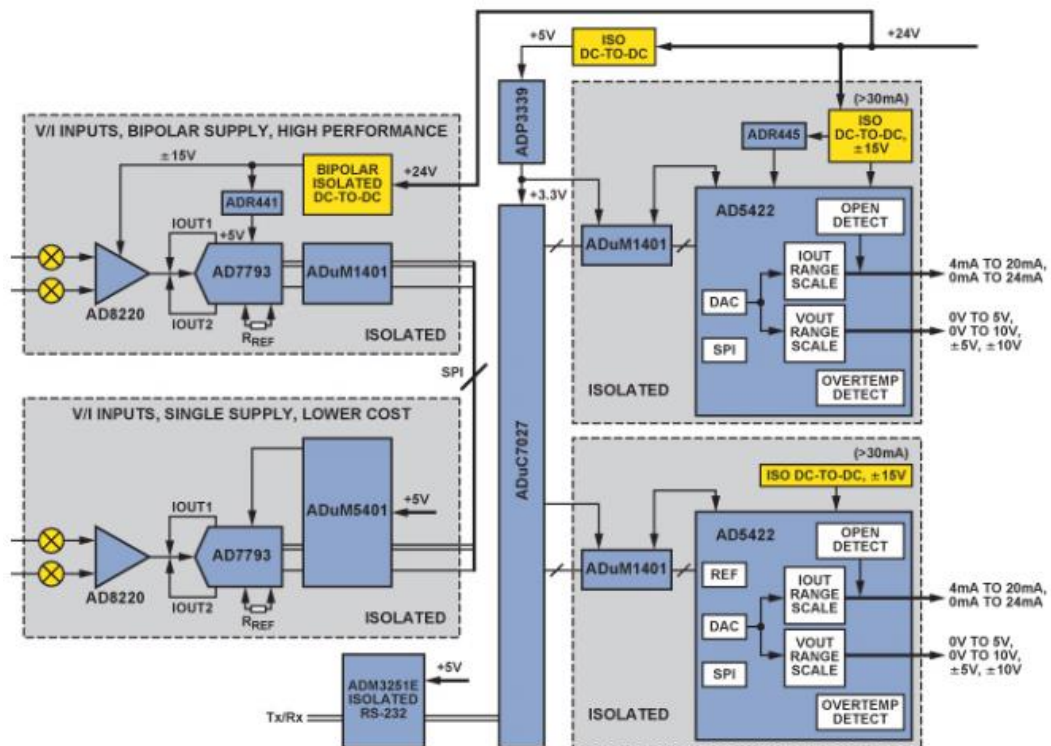


Figura 5-7 Diagrama de adaptación de interfaces de sensores. [51]

5.3 CAPA 1: CONTROL DE BAJO NIVEL

La capa de control de bajo nivel está constituida por los elementos conectados con los sensores y actuadores y que implementan los mecanismos necesarios para que la lectura de los sensores e instrumentos y la actuación sobre los actuadores sea óptima y efectiva.

A esta capa pertenecen por tanto los acondicionadores de señal, conversores de interface, protecciones y aislamientos, reguladores y lazos de control de bajo nivel.

Esta capa suele estar compuesta de dispositivos tipo PLC (Programmable Logic Controller) conectados mediante una red de campo (Modbus, Profibus, Ethernet, etc.) con los controladores principales y con la capa inferior de sensores y actuadores.

Las principales funciones implementadas en esta capa son:

- Acondicionar las señales de los sensores.
- Comandar los circuitos auxiliares necesarios para la captación óptima de datos.
- Implementar la regulación necesaria en operaciones de arranque, parada, funcionamiento en consigna, estados especiales, etc. utilizando para ello mecanismos regulación tipo PID (Proporcional Integral Derivativo), máquinas de estados, etc.
- Implementar la actuación recibida de las capas superiores.

La Figura 5-8 y la Figura 5-9 muestran la capa de control de bajo nivel.

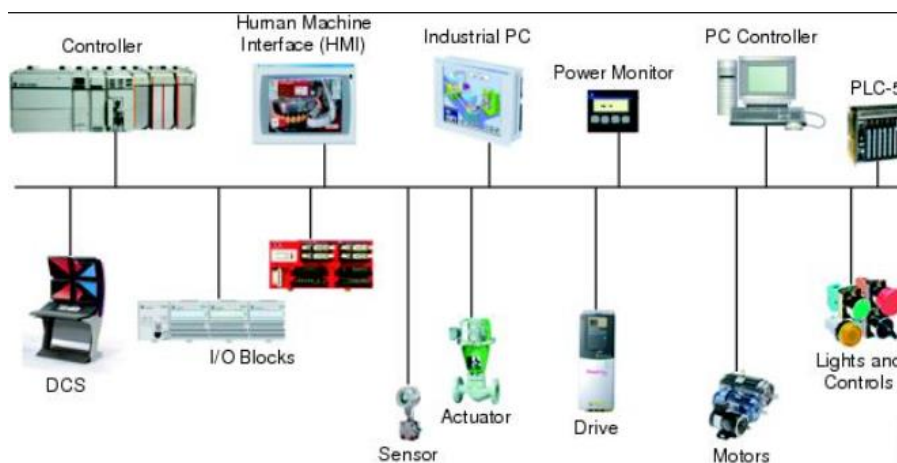


Figura 5-8 Capa de control de bajo nivel y elementos que lo componen. [52]

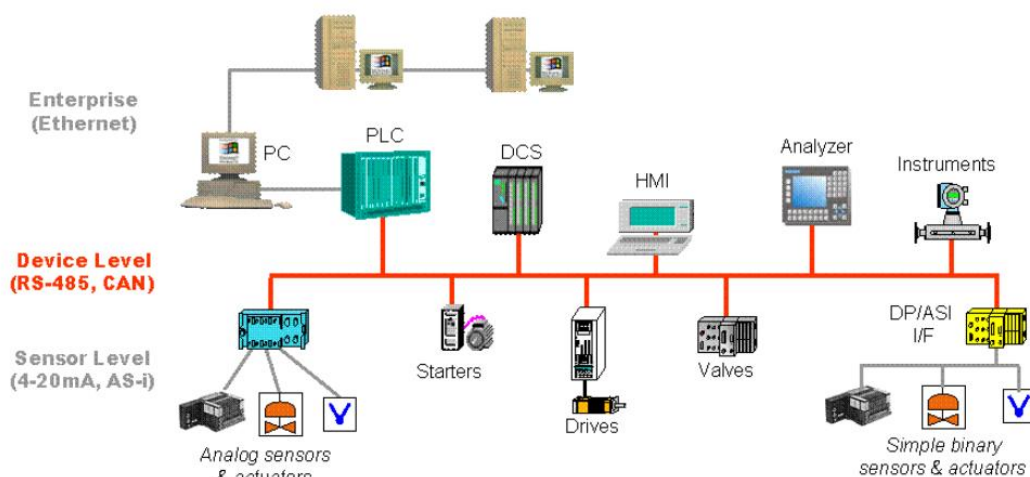


Figura 5-9 Capa de control de bajo nivel. [53]

La Figura 5-10 muestra un diagrama de buses de campo atendiendo a su categoría.

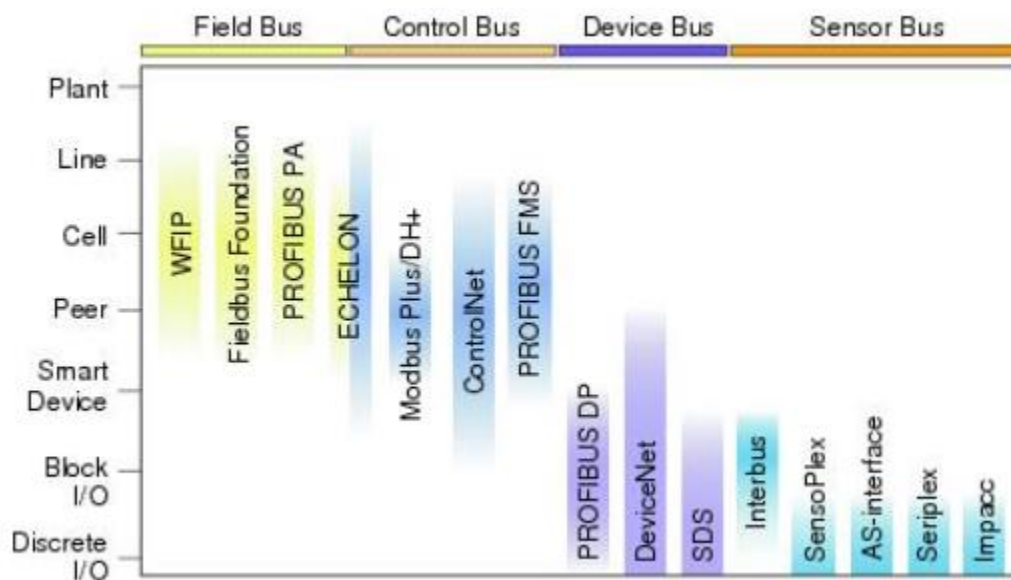


Figura 5-10 Diagrama de buses de campo. [53]

5.4 CAPA 2: CONTROL PRINCIPAL

En esta capa se encuentran los dispositivos que implementan los controles principales de la línea o de máquinas principales de secciones complejas.

El control principal se realiza utilizando dispositivos de altas prestaciones de proceso, memoria y comunicaciones siendo los más usados los de tipo PLC (Programmable Logic Controller) y los de PC industrial. Un controlador principal controla y se comunica con múltiples dispositivos remotos o esclavos implementando un control completo de la máquina sección o línea.

En instalaciones de baja complejidad esta capa suele estar integrada con la capa inferior (control de bajo nivel) conformando la capa de control a bajo nivel.

La Figura 5-11 muestra la capa de control principal o proceso.

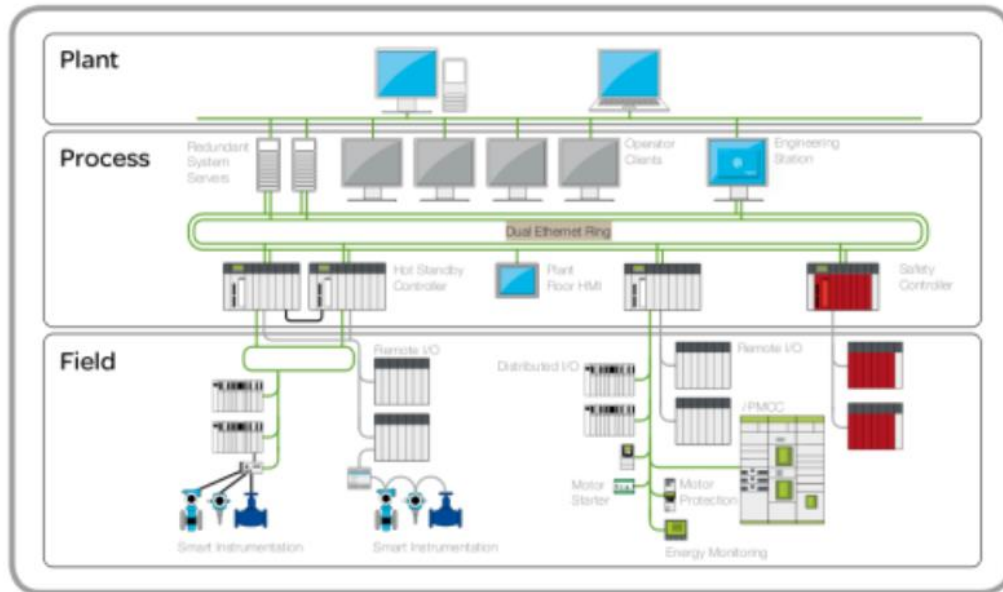


Figura 5-11 Diagrama de capas mostrando la capa de control principal o proceso.
[54]

5.5 CAPA 3: MONITORIZACIÓN, MANDO Y CONTROL

La capa de monitorización, mando y control implementa las funciones de mando y control así como la supervisión de la operación. Fundamentalmente está constituida con sistemas de tipo SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) normalmente ubicados en salas específicas denominados “salas de control” o “panel de control”.

Esta capa se suele implementar mediante ordenadores tipo PC industrial dotados de grandes pantallas que permitan la monitorización sinóptica.

Los sistemas SCADA son programas informáticos que dotados de los drivers de comunicación necesarios para establecer la comunicación con los buses de campo de la instalación proveen las siguientes funciones:

- Monitorizar y visualizar las variables, estados y alarmas en tiempo real.
- Almacenar las variables, estados y alarmas en una base de datos.
- Visualizar datos históricos de variables, estados y alarmas.
- Múltiple presentación de datos, valores, gráficas, tablas, sinópticos, etc.
- Acciones de control y comando de la instalación.
- Informes de variables, estados y alarmas.
- Integración con sistemas de control avanzado en su caso.
- Integración con sistemas centrales en su caso.

En la *Figura 5-12* adjunta se muestra un esquema general de un sistema SCADA.

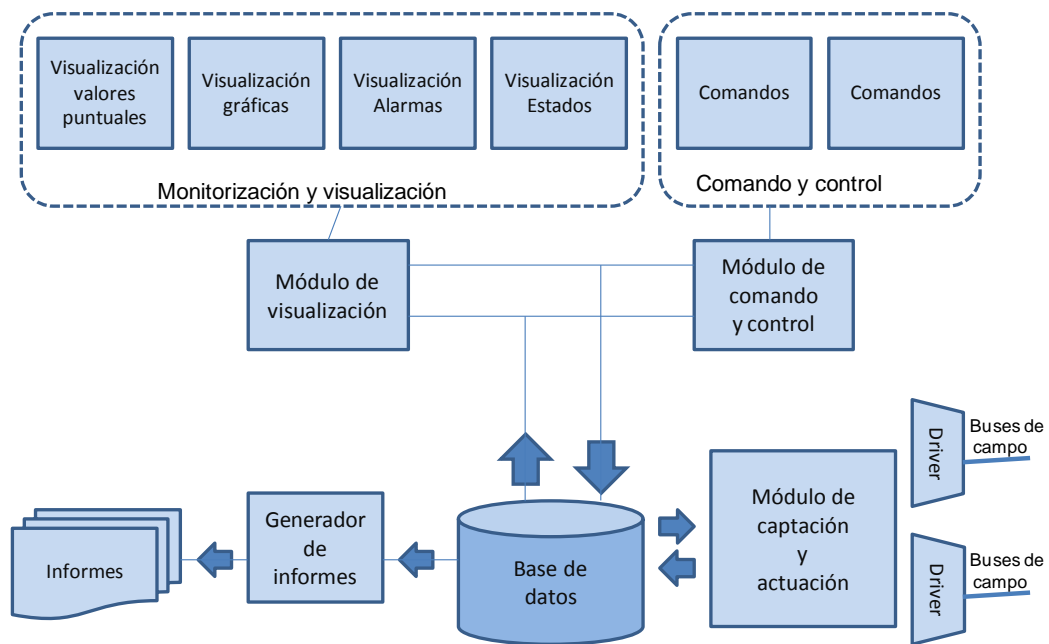


Figura 5-12 Esquema general de un sistema SCADA. [6]

En ocasiones cuando en la instalación industrial no existe control avanzado e integración con sistemas centrales esta capa constituye la última capa de automatización y en ese caso será la capa candidata para la integración del procesador de modelos de dispersión.

La *Figura 5-13* muestra ejemplos de integración de la capa SCADA con las capas inferiores.

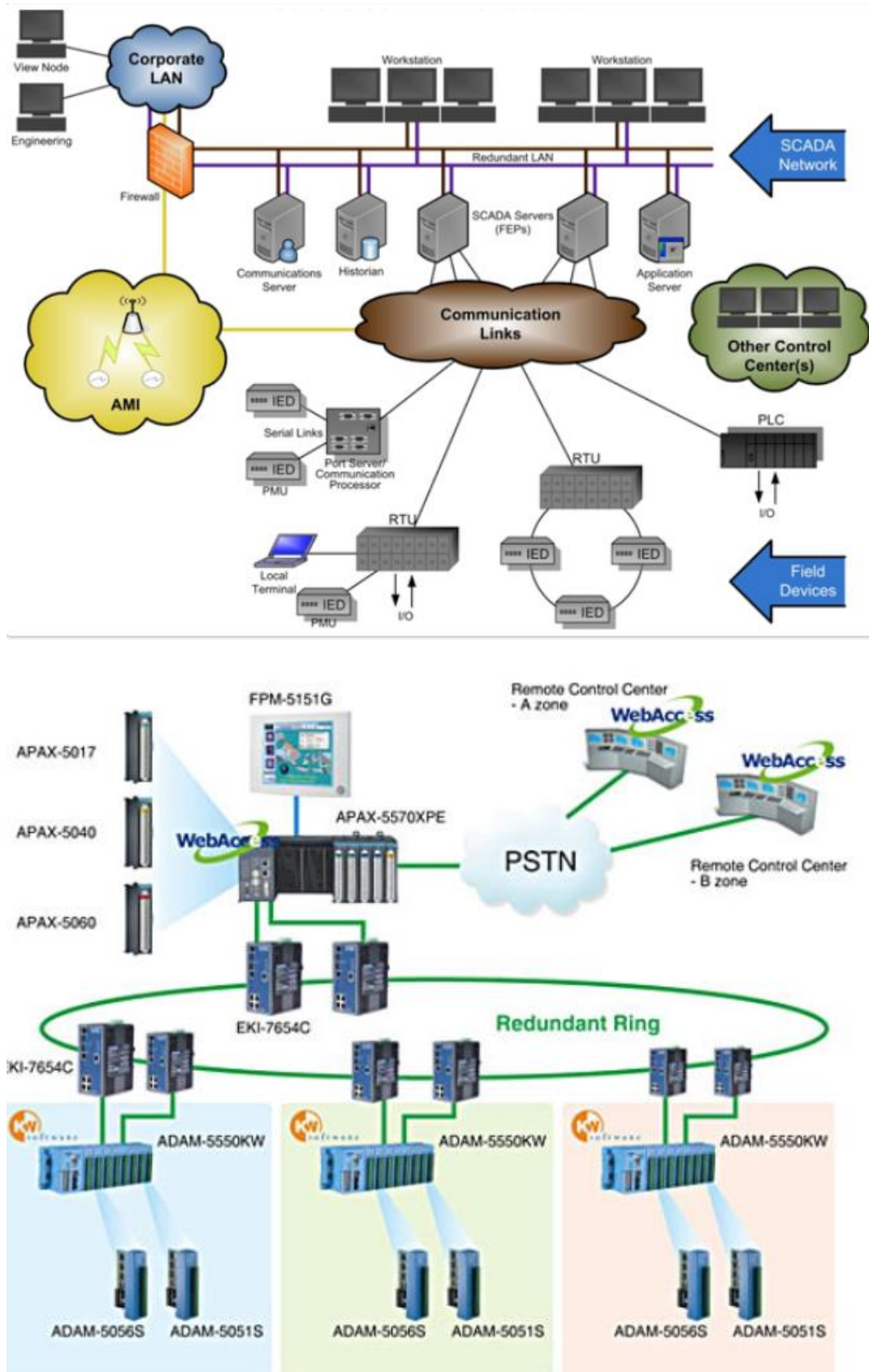


Figura 5-13 Diagramas de sistema SCADA y su integración con las capas inferiores. [55], [56]

La Figura 5-14 muestra un ejemplo de interface de usuario de un sistema SCADA.

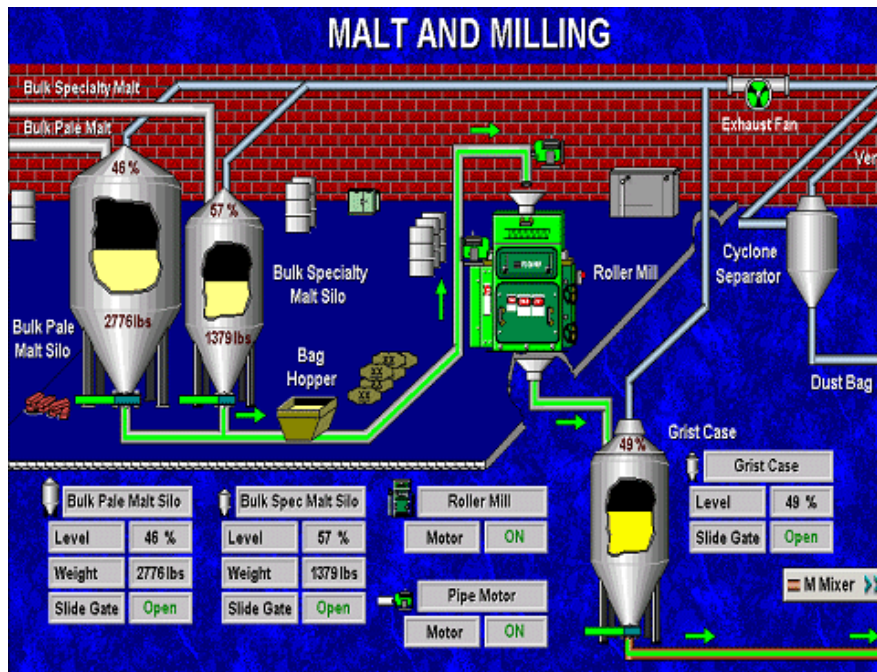


Figura 5-14 Ejemplo de interface de usuario de sistema SCADA. [57]

5.6 CAPA 4: CONTROL AVANZADO O CONTROL DE ALTO NIVEL

Esta capa, cuando existe, implementa controles avanzados contemplando varias líneas o secciones. También permite explotar datos de varias secciones generando informes complejos e implementando la integración con los sistemas centrales. Esta capa se suele denominar MES (Manufacturing Execution System ó Manufacturing Enterprise System).

En la Figura 5-15 adjunta se muestra un diagrama de un sistema MES.



Figura 5-15 Diagrama de implantación de un Sistema MES. [58]

En ocasiones la capa MES incluye las capas inferiores y el conjunto de control de planta y las capas que lo componen se simplifica.

La Figura 5-16 y la Figura 5-17 muestran el diagrama de estructuras de la capa MES y la ubicación de la capa MES en un esquema de control de 4 capas según el standard ISA95.

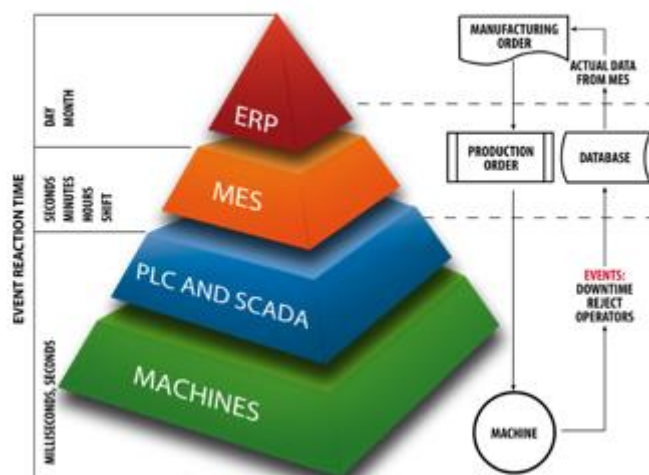




Figura 5-16 Diagramas de estructuras con capa MES. [58].

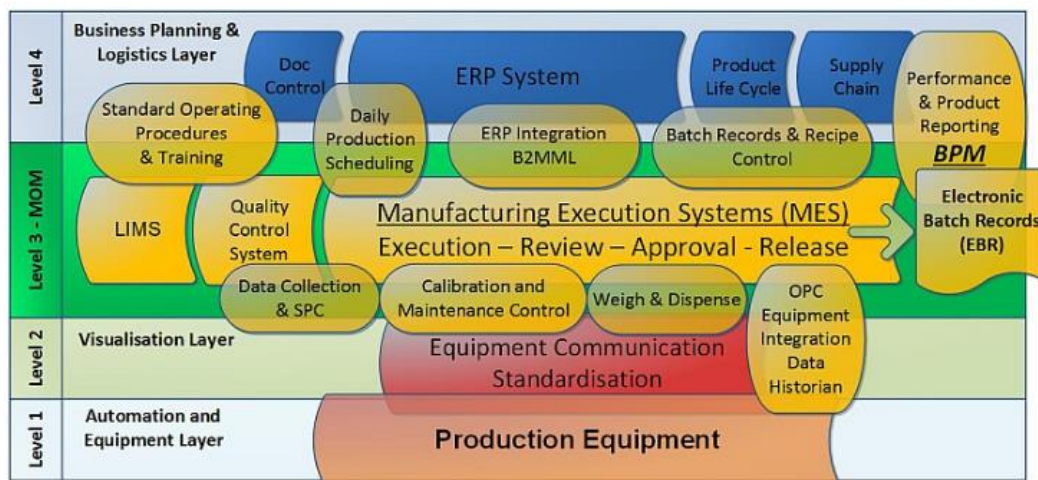


Figura 5-17 Ubicación de la capa MES en un esquema de 4 capas según el standard ISA95. [59]

5.7 CAPA 5: SISTEMAS CENTRALES

Esta capa constituye el conjunto de sistemas centrales, situando en primer lugar el ERP (Enterprise Resource Planning) y otros sistemas centrales auxiliares (que a veces forman parte del ERP) tales como CRM (Customer Resource Management), SCM (Supply Chain Management), BI (Business Intelligence), KM (Knowledge Management), etc.

Los sistemas centrales principales son plataformas generalistas con muy altas capacidades de configuración que permiten que se puedan configurar para una gran variedad de categorías industriales.

Los sistemas centrales de mayor implantación en la industria son la plataforma SAP [60] y ORACLE [61].

La Figura 5-18 muestra varios diagramas de plataforma central basada en SAP, y la Figura 5-19 muestra un diagrama de sistemas centrales basado en ORACLE.

SAP Business Suite Modules



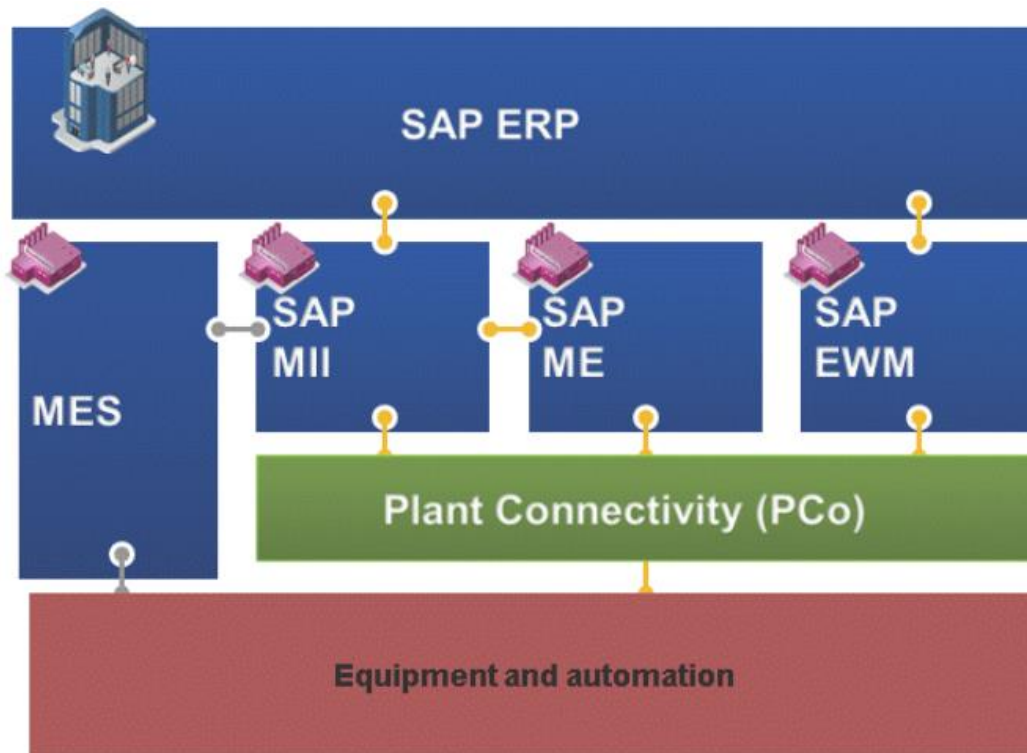


Figura 5-18 Diagramas de plataforma central basada en SAP. [60]



Figura 5-19 Diagrama de plataforma central basada en ORACLE. [61]

6 INTEGRACIÓN DE MODELOS DE DISPERSIÓN EN SISTEMAS DE CONTROL DE PLANTA

En este capítulo se aborda la integración del módulo que contiene el procesador del modelo de dispersión en el esquema de control de planta.

Es muy importante resaltar que la integración de los modelos de dispersión en el control de planta, tiene como principal objetivo mejorar los resultados de la planta, asegurando también el cumplimiento de los límites establecidos por la legislación medioambiental o por las características productivas de la propia planta.

En ningún caso será un objetivo del control de planta, controlar la emisión de contaminantes no permitidos o expresamente prohibidos con el fin de disimular u ocultar su presencia.

La integración del módulo procesador del modelo de dispersión se plantea por tanto como una mejora al sistema de control de planta al dotar a este de nuevas capacidades de control al utilizar los valores de variables de predicción (adicionalmente a los valores tradicionales actuales e históricos).

Para conseguir la efectiva integración del nuevo módulo en los esquemas de control de planta será necesario diseñar un plan de implantación que contemple la perfecta integración tanto de las variables de entrada al módulo como de las salidas para que éstas puedan utilizarse eficientemente.

En los siguientes apartados, se presenta el proceso general para abordar la integración, así como diferentes esquemas de integración correspondientes a escenarios habituales de plantas industriales con diferentes niveles de complejidad.

6.1 ANÁLISIS PRELIMINAR

A nivel general, el diseño de cualquier esquema de integración de un nuevo módulo en un esquema de control, conlleva la necesidad de un análisis en primer lugar de la planta y de su estado desde el punto de vista del control industrial y a continuación de los objetivos que se pretenden alcanzar, los modelos a considerar y los caminos de integración.

A continuación, en la *Figura 6-1* se muestra un flujograma del análisis preliminar de decisión de aplicación de modelos de dispersión en una planta. El objetivo de este análisis preliminar es determinar si objetivamente la planta es candidata a la aplicación/integración de un modelo de dispersión en el esquema de control de planta.

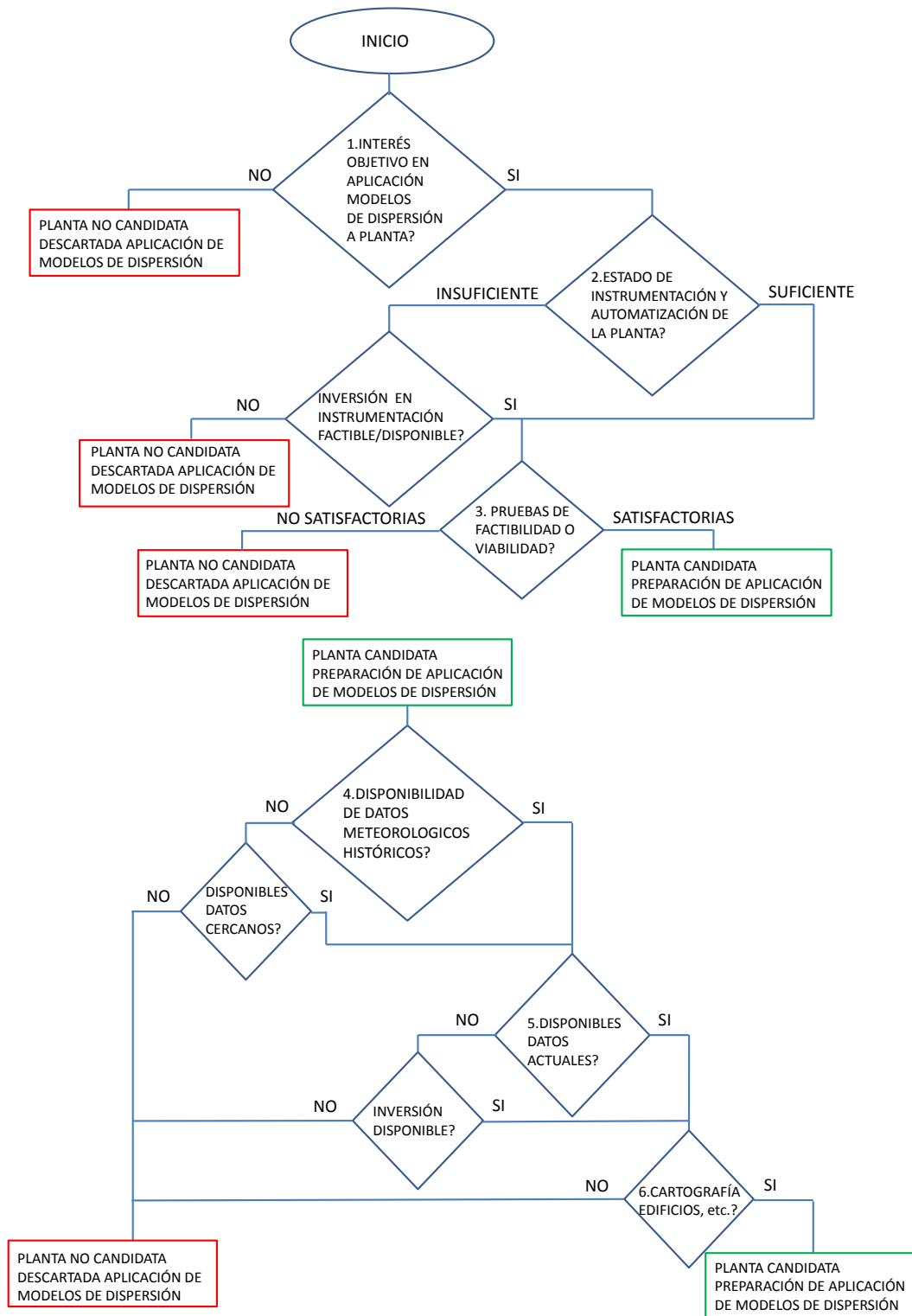


Figura 6-1 Diagrama de análisis preliminar de decisión de aplicación de modelos de dispersión en planta. [6]

DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación se describen en detalle cada uno de los bloques del flujograma de análisis preliminar de decisión de aplicación de modelos de dispersión en planta.

1. Interés en los modelos de dispersión para mejorar el control industrial de una planta. Parece obvio que no todas las plantas industriales son susceptibles de obtener mejoras por la utilización de modelos de dispersión.

Serán potenciales candidatas aquellas instalaciones con algunas de las siguientes características:

- Plantas con chimeneas de emisión de humos (gases y partículas) generados por la combustión de combustibles fósiles (carbón, fuel, gas, etc.).
 - Plantas con chimeneas de emisión de partículas generadas por moliendas de materiales.
 - Plantas con chimeneas de emisión de humos (gases y partículas) tales como incineradoras de residuos, de clasificación de materiales y transformación de materiales con calor.
 - Plantas con almacenamiento a cielo abierto de materiales pulverulentos como arena, cal, clinker, cenizas, carbón, etc.
 - Explotaciones agrícolas con almacenamiento abierto de cereales, fertilizantes y residuos granulares finos.
2. Estado de instrumentación y automatización de la planta. Dado que la implantación de un modelo de dispersión se plantea como una mejora al control de planta existente, el estado actual del control de planta, su nivel de instrumentación es un punto de referencia clave en la determinación de la factibilidad de aplicación de los modelos de dispersión. En muchas ocasiones serán necesarias inversiones previas en la instrumentación de planta, en el control de planta o en ambas.
 3. Pruebas de factibilidad o viabilidad. Antes de analizar la integración de un modelo de dispersión en el esquema de control de planta, es muy importante realizar las pruebas manuales con los modelos candidatos para disponer de los datos necesarios que confirmen o descarte la viabilidad de la integración. Algunas pruebas a considerar en este apartado son las siguientes:
 - Determinación y posicionamiento geográfico de las fuentes de emisión así como su categoría (puntuales, de área, de volumen, altura de emisión, etc.).
 - Determinación de la composición de las emisiones que apliquen (gases o partículas).
 - Determinación de otros parámetros relevantes de emisión (velocidad de emisión, caudal, etc.), evolución temporal y su relación con las variables de la planta y las variables meteorológicas.
 - Recogida de datos de inmisiones en puntos cercanos, distancia media y en puntos lejanos de las fuentes de emisión.
 4. Análisis de disponibilidad de datos meteorológicos históricos. Se requieren datos históricos de hasta 5 años de antigüedad de los siguientes parámetros

meteorológicos (en caso de no disponerse de datos locales en las fuentes se pueden utilizar datos de estaciones meteorológicas cercanas):

- Rosa de los vientos (dirección y velocidad) con integración diaria o semanal.
 - Histórico de precipitaciones con integración diaria o semanal.
 - Histórico de temperaturas (máxima y mínima) con integración diaria o semanal.
5. Disponibilidad de datos meteorológicos actuales (preferiblemente en datos en línea).
 6. Disponibilidad de datos cartográficos precisos de la planta y del entorno de la planta.
 7. Ubicación de edificios y obstáculos cercanos que pudieran afectar o condicionar las emisiones (colinas, montañas, cañones naturales, cañones artificiales (p.e. movimiento de tierras producido por una autopista o vía de ferrocarril).
 8. Determinación de otras fuentes que pudieran afectar a la emisión (p.e. otras plantas cercanas, carreteras cercanas, etc.).
 9. Pruebas de validación con modelo en ejecución manual y contraste de resultados de predicción obtenidos con medidas reales posteriores (calibración de modelo).

6.2 APLICACIÓN GENÉRICA DE UN MODELO DE DISPERSIÓN

La *Figura 6-2* muestra el diagrama de aplicación de un modelo de dispersión, de forma independiente al control de planta (aunque algunas variables pudieran estar compartidas con el control de planta) también denominado autónomo o standalone.

En ocasiones, esta aproximación puede ser un buen punto de partida antes de implantar un modelo de dispersión integrado en el control de planta.

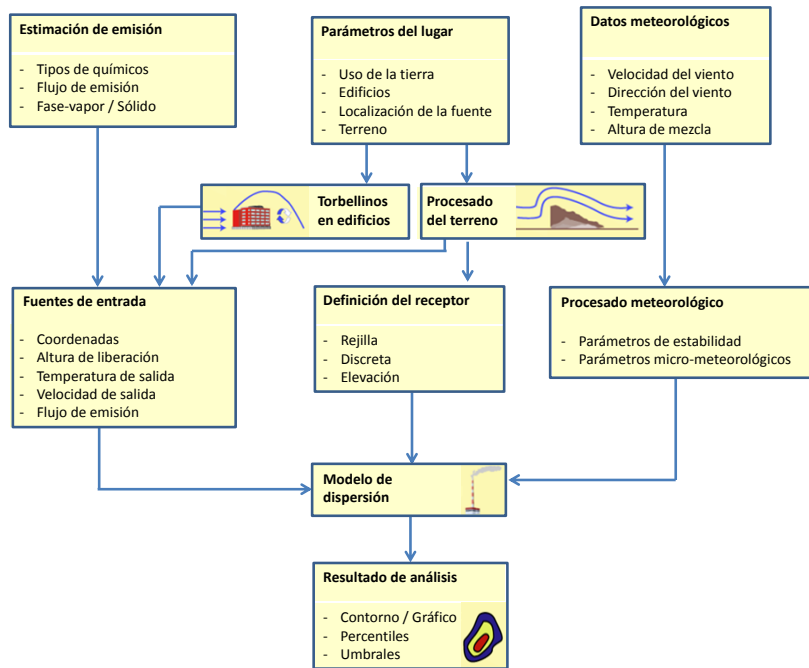


Figura 6-2 Diagrama de aplicación de un modelo de dispersión. [4], [5], [38]

La ubicación más conveniente para el procesador del modelo de dispersión es sobre la capa de “Monitorización, mando y control”, principalmente debida a sus requerimientos de las variables de entrada. Las capas superiores no suelen disponer de las variables de campo discretas sino variables procesadas o resumidas no adecuadas para alimentar el procesador del modelo de dispersión.

La elección de la ubicación del procesador es también muy importante desde el punto de vista del personal que lleva a cabo su configuración y operación. La capa de “Monitorización, mando y control” es responsabilidad de los ingenieros de control de procesos, optimización avanzada, etc. que disponen del perfil técnico adecuado para configurar y operar los procesadores de los modelos de dispersión.

Por lo tanto la ubicación del procesador al nivel planta no depende en general del esquema de control de cada planta, aunque su posición en el esquema general de control de una compañía si estará determinado por lo esquemas implementados.

A continuación se muestra la ubicación en los esquemas de control de planta presentados anteriormente.

La Figura 6-3 muestra la ubicación del modelo de dispersión en un esquema de control de planta de 6 capas.

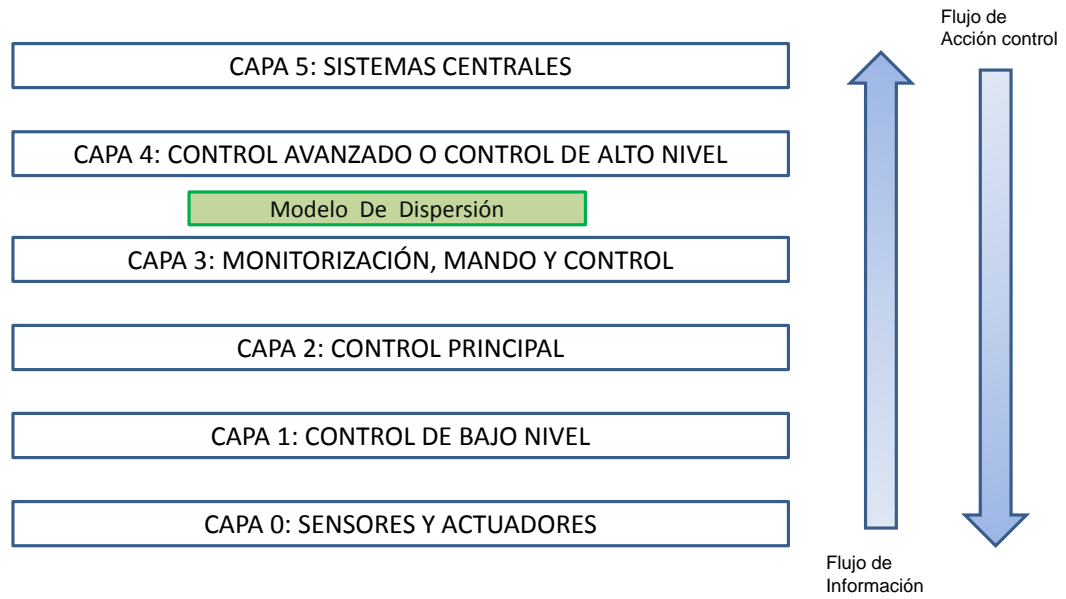


Figura 6-3 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 6 capas. [6]

La Figura 6-4 muestra la ubicación del modelo de dispersión en un esquema de control de planta de 4 capas.

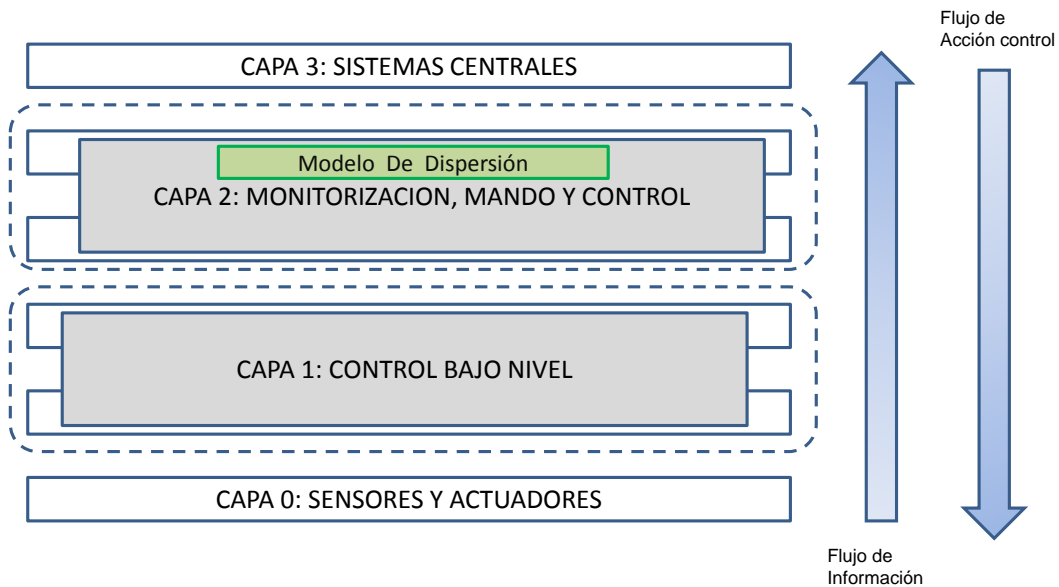


Figura 6-4 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 4 capas. [6]

La Figura 6-5 muestra la ubicación del modelo de dispersión en un esquema de control de planta de 3 capas.

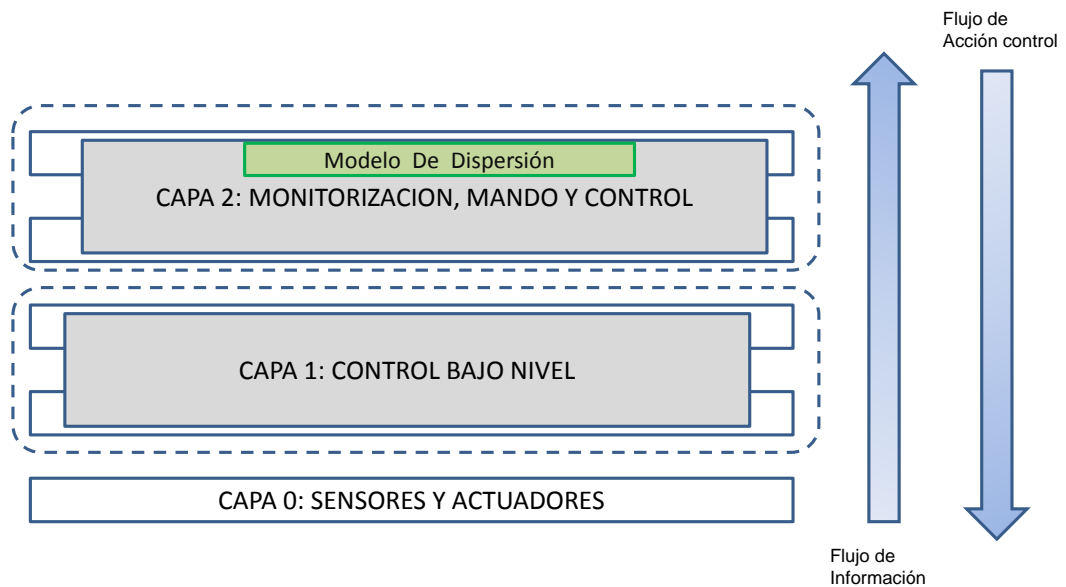


Figura 6-5 Ubicación del modelo en un esquema de control de planta de 3 capas. [6]

La Figura 6-6 muestra el diagrama de bloques de un sistema SCADA integrando el modelo de dispersión pero sin integración de mando y control.

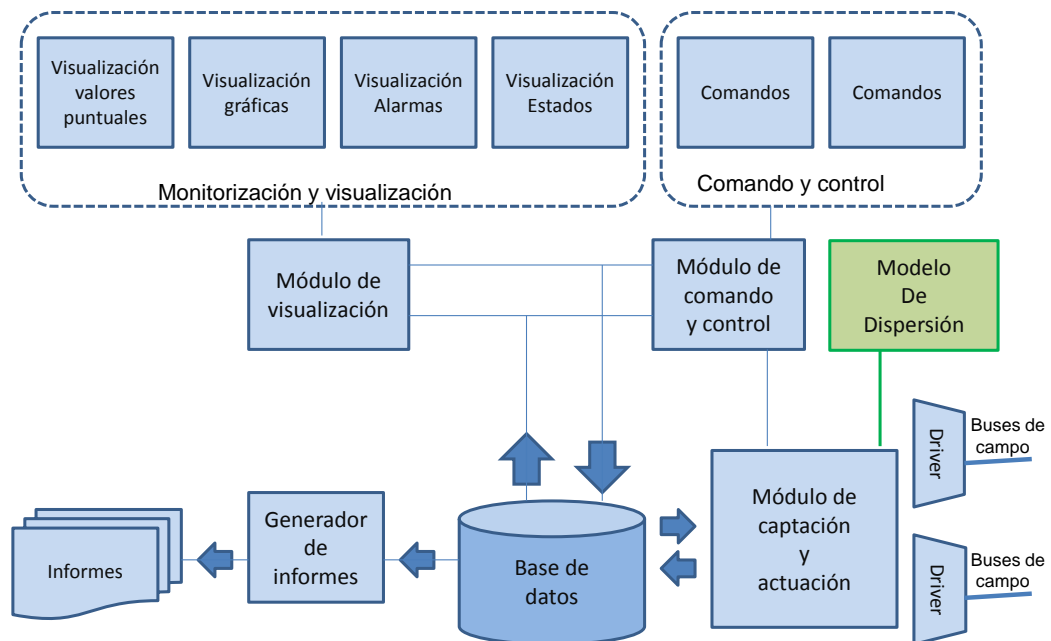


Figura 6-6 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema SCADA (solo monitorización). [6]

La utilización de la infraestructura de control de planta durante todas las fases previas a la implantación del modelo de dispersión, facilita el conocimiento por parte del personal técnico de los requerimientos del modelo de dispersión y de las variables de campo involucradas. Este conocimiento adelantado por parte del personal técnico de planta, es

un factor clave en la implantación del modelo de dispersión ya que sus resultados dependen totalmente de la “calidad” de las variables utilizadas y algunas variables antes accesorias para el control de planta pasan ahora a ser críticas para los modelos de dispersión. Por ejemplo, una sonda de temperatura en una chimenea de gran diámetro o con tiro no uniforme puede entregar valores de temperatura que no corresponden con la temperatura de la mayor parte de gas o partículas emitidas; Estos detalles son conocidos por el personal técnico de campo de la planta pero pueden ser desconocidos por los ingenieros de control debido a la categoría accesorio de la variable antes de implantar el modelo de dispersión.

Como resumen de este apartado, se puede decir que el rigor y extensión de los análisis preliminares, la correcta ubicación en el esquema de control de planta y la involucración del personal técnico de la planta son los tres factores más importantes y que determinarán el éxito de la integración.

6.3 ANÁLISIS DE INTEGRACIÓN EN EL MODELO DE CONTROL DE PLANTA.

Una vez completados de forma satisfactoria los análisis preliminares de aplicación y la validación con modelos en ejecución autónoma o standalone, la siguiente etapa contempla la integración del modelo de dispersión en el control de planta. Conviene tener muy en cuenta que la integración conllevará efectos de diferente magnitud en todas las capas del control de planta. El dimensionamiento de estos efectos y el impacto en la operativa de la planta son claves y determinantes para el éxito del proyecto.

El paso descrito en el capítulo anterior en el que el modelo de dispersión se ejecuta sin integrar en el control de planta, tiene como principal objetivo además de confirmar con sus resultados el interés del modelo, debe proporcionar datos objetivos para abordar el análisis de la integración.

El enfoque de integración más conveniente es comenzar la integración desde las capas superiores del esquema de control de planta por las siguientes razones principales:

- Posibilita disponer del mayor número de variables de control que posibiliten la cualificación de los resultados del modelo.
- Permite evitar la modificación en las capas inferiores que además de ser más costosas en la implementación, conllevan un elevado riesgo de inestabilidad especialmente en los lazos de regulación de bajo nivel.

Con el fin de minimizar riesgos y asegurar el éxito de la integración es recomendable seguir las siguientes recomendaciones de aplicación:

- Asimilar cuanto sea posible las acciones de mando y control generadas por los resultados del modelo de dispersión a las acciones de mando y control provenientes de las capas superiores o de consignas establecidas manualmente.
- Aplicar de forma paulatina la automatización después de confirmar las acciones de mando y control aplicadas manualmente.

Aplicar este enfoque de integración y el seguimiento de las recomendaciones de aplicación, posibilita la propagación de los resultados del modelo al control de planta con las mínimas perturbaciones durante el transitorio de integración en el control de planta. Conviene recordar en este punto que la integración de un modelo de dispersión en el control de planta se realiza normalmente con la planta en operación y el objetivo deseable es que no afecte a la producción de la misma.

La Figura 6-7 muestra el diagrama de bloques de un sistema SCADA integrando el modelo de dispersión con integración de mando y control.

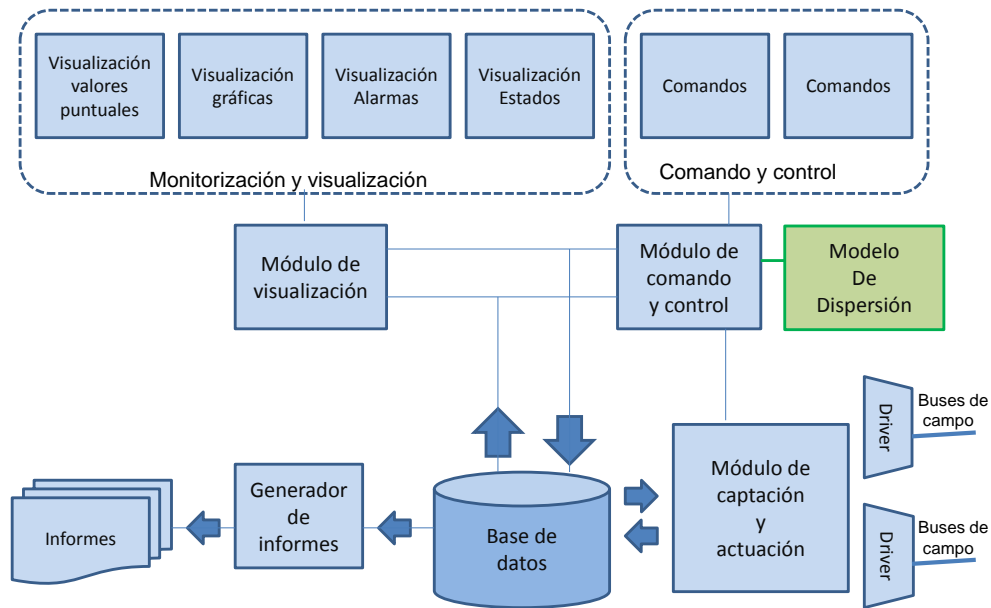


Figura 6-7 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema SCADA (con integración de mando y control). [6]

Una posible mejora en la eficacia de la integración se consigue implementado una conexión adicional con la capa de control de bajo nivel con el fin disponer de los de captación de forma más rápida en el modelo. Sin embargo la ubicación en la capa inferior conlleva algunos inconvenientes cuando se requieren otras variables, como por ejemplo las relacionadas con la planificación de producción, que no están disponibles en la capa inferior, por lo que este movimiento debe ser analizado caso por caso para ponderar las ventajas e inconvenientes.

La Figura 6-8 muestra el diagrama de bloques de un sistema SCADA integrando el modelo de dispersión con integración de mando y control y captación directa desde la capa control de bajo nivel.

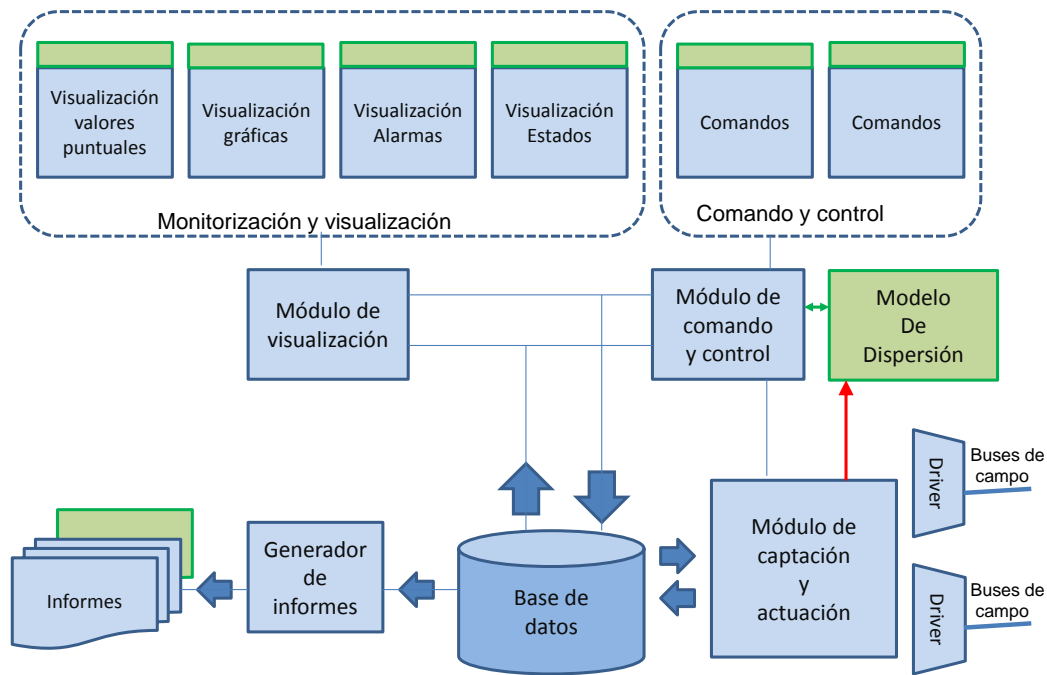


Figura 6-8 Diagrama de bloques mostrando la ubicación del modelo en un sistema SCADA (con integración de mando y control y captación directa). [6]

La integración física del procesador del modelo de dispersión en el esquema de control de planta es dependiente del paquete seleccionado para implementar el modelo y también de los sistemas presentes en el control de planta. Con carácter general se pueden enunciar tres niveles de integración:

- Integración fuertemente acoplada mediante API (Application Programming Interface). Esta integración requiere que el paquete seleccionado disponga de API o en su defecto de código fuente en la que se pueda desarrollar la integración con el control de planta. La principal ventaja de esta integración es la eficacia que se consigue y como inconvenientes podemos citar el alto coste involucrado en el desarrollo de la integración y la imposibilidad de integrar algunos paquetes que no disponen de API o no están disponibles en código fuente.
- Integración débilmente acoplada mediante ficheros de intercambio de datos. Esta integración se realiza cuando el paquete seleccionado no dispone de API ni está disponible en código fuente. El principal inconveniente de esta integración es la debilidad que supone la comunicación basada en ficheros y su dinámica de ejecución (dificultad de sincronizar su disponibilidad).
- Integración híbrida que combina la integración mediante API con otros mecanismos como ficheros de datos, acceso a bases de datos, etc. Esta integración es la más habitual ya que permite alcanzar la integración en la mayoría de escenarios de control de planta y no está limitada por la disponibilidad de inversiones cuantiosas.

6.4 ESCENARIOS DE APLICACIÓN

Los escenarios de aplicación de modelos de dispersión son muy amplios y crecen en número cada día debido a la aparición y evolución de tecnologías facilitadoras como M2M, IoT, Cloud y SmartCities que comentaremos con mayor detalle en los próximos apartados.

Los escenarios tradicionales de aplicación relativos al control directo de las emisiones, eran plantas industriales con emisiones a la atmósfera y/o instalaciones de todo tipo, con almacenamiento de materiales a cielo abierto los cuales presentan potencial de transporte en suspensión principalmente por efecto del viento.

Entre estos escenarios tradicionales podríamos citar, entre otros, los siguientes:

- Grandes instalaciones de combustión:
 - Planta con hornos como fábricas de cemento, fábricas de vidrio, siderúrgicas, etc.
- Compuestos orgánicos e inorgánicos volátiles almacenados a cielo abierto o en tanques con posible emisiones:
 - Instalaciones agrícolas y ganaderas, canteras, fábricas de piensos, almacenes de carburantes, etc.
- Incineración y co-incineración:
 - Incineradores, plantas de reciclado, refinerías, etc.
- Otras instalaciones industriales:
 - Químicas, Celulosas, etc.
- Transporte por carretera, tren, aire, etc.
- Etc.

Los nuevos escenarios de aplicación son los relativos a la medida de la calidad del aire, identificación de las fuentes de emisión y la anticipación de sus efectos. Estos nuevos escenarios surgen como consecuencia de la implantación de captadores masivos directos e indirectos que posibilitan la aplicación de los modelos con datos antes inexistentes.

Algunos de estos nuevos escenarios son:

- Calidad del aire en ciudades o incluso determinadas zonas de las mismas como parques, cercanías de aeropuertos, zonas limítrofes a vías de alta densidad de tráfico
- Calidad del aire en espacios naturales como parques forestales, lagunas, playas, valles, cumbres de montañas, etc.
- Calidad del agua en ríos, playas, humedales, etc.
- Contaminación acústica.
- Contaminación luminosa.
- Contaminación y dispersión de olores en la atmósfera.
- Etc.

6.5 TECNOLOGÍAS M2M, IoT Y CLOUD

En este apartado se analiza el efecto de la consolidación de las tecnologías M2M (Machine To Machine) y la aparición de las tecnologías de IoT (Internet of Things) y Cloud (Proceso en la nube). La aparición y consolidación de estas tecnologías favorece la implantación de modelos de dispersión al multiplicar las fuentes de datos tanto directas como indirectas y facilitar enormemente el acceso a los mismos.

Las tecnologías M2M de comunicación entre máquinas y entre máquinas y sistemas de tecnologías de la información han evolucionado y consolidado apoyadas en dos pilares:

- La evolución del proceso embebido sobre en plataformas de baja capacidad de proceso que incluyen una capacidad de comunicación normalmente de bajo ancho de banda (desde unos bits/segundo hasta un varios kilobits/segundo).
- La evolución y abaratamiento de las comunicaciones inalámbricas o celulares con canales de ancho de banda reducido.

Algunas tecnologías inalámbricas como Sigfox, LoRa, ZigBee, GPRS, Bluetooth, WiFi y WiMax y también cableadas como PLC (Power Line Communications), son ejemplos de tecnologías que sin duda han contribuido a que M2M se haya consolidado y extendido de forma generalizada.

La *Figura 6-10* muestra un diagrama de bloques de un escenario M2M presentado por un fabricante de semiconductores.

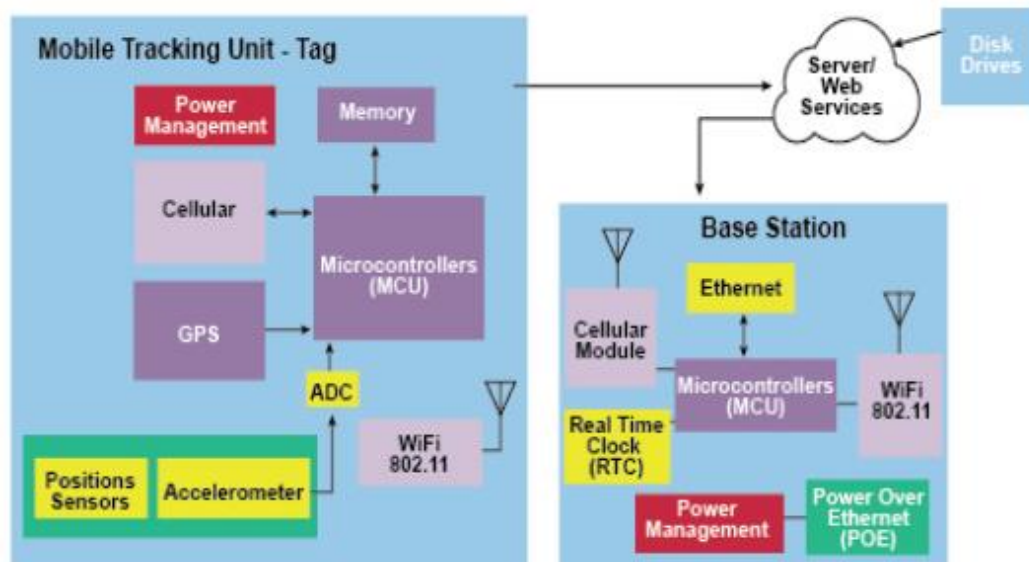


Figura 6-9 Diagrama de bloques de un ejemplo de escenario M2M presentado por un fabricante de semiconductores. [62]

La aparición de IoT (Internet of Things) se considera la evolución de M2M aportando una capa superior, que se apoya en M2M, pero también la universalización y generalización de las comunicaciones entre dispositivos cada vez más variados y amplios.

En el desarrollo de IoT también está contribuyendo la expansión de las tecnologías domóticas como KNX, ZWave etc. que aportan nuevas fuentes de datos y nuevos dispositivos de control.

El eslabón faltante para que la evolución de M2M e IoT se completase, lo están aportando las tecnologías “cloud” o procesamiento en la nube. Las tecnologías “cloud” directamente nacidas del crecimiento en capacidad de proceso y comunicaciones de la infraestructura informática y de las tecnologías de información se han consolidado con el avance de las tecnologías de virtualización. Las tecnologías de virtualización junto a servicios de hosting y housing (servicios de alojamiento virtual o servicios de alojamiento físico) constituyen la base del procesamiento “cloud” o sistemas en la nube.

Por último citar también las tecnologías Big Data, Data Warehouse y Data Mining que surgen para gestionar y procesar la enorme cantidad de datos que producen entre otras las tecnologías M2M e IoT, y por supuesto también las redes sociales, la propia Internet, etc.

La Figura 6-10 muestra un diagrama de bloques de la arquitectura mostrando los tres núcleos: las cosas, la red y la nube.

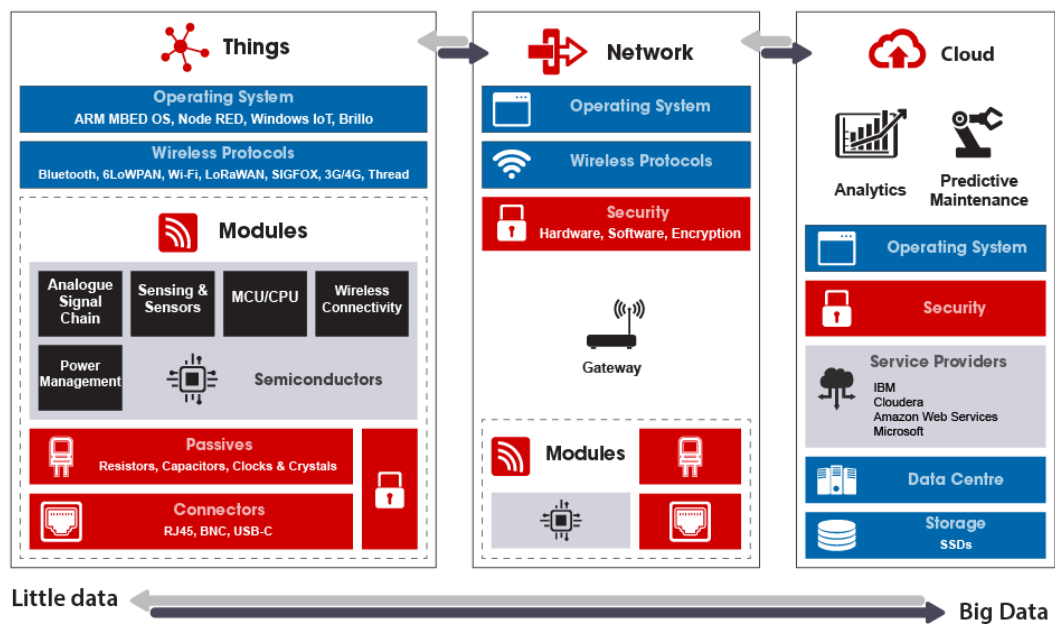


Figura 6-10 Diagrama de bloques de la arquitectura IoT. [63]

La Figura 6-11 muestra un diagrama de elementos involucrados en el procesamiento en la nube (cloud computing) mostrando también las tres capas: arquitectura, plataforma y aplicación.

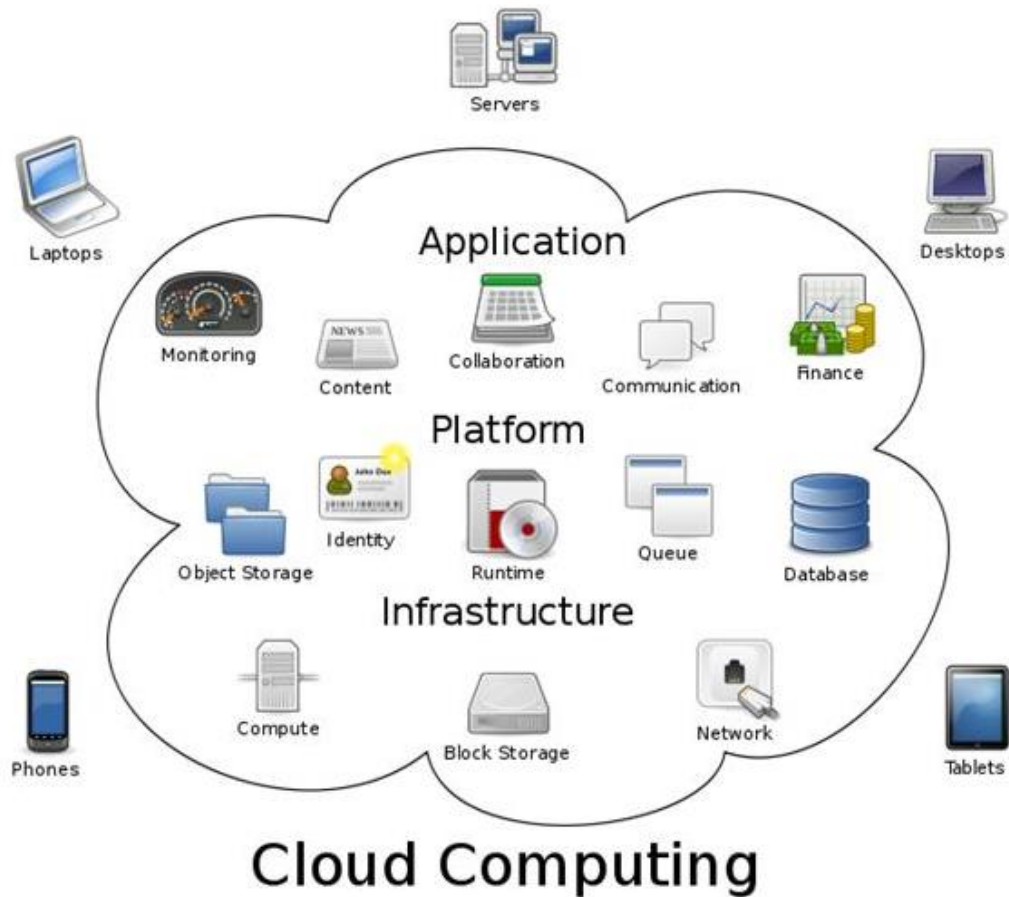


Figura 6-11 Diagrama de elementos involucrados en cloud computing y sus capas. [64]

La Figura 6-12 muestra la cadena de proceso de datos mostrando la ubicación del bloque de “data mining” como bloque previo al proceso final de interpretación o evaluación.

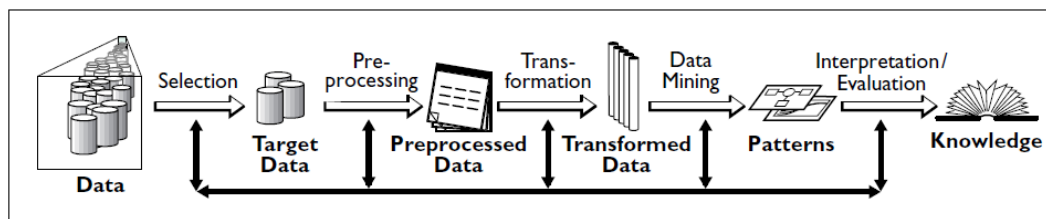


Figura 6-12 Cadena de proceso de datos incluyendo “Data Mining” para la extracción del conocimiento. [65]

La Figura 6-13 muestra un ejemplo de arquitectura de Data Warehouse.

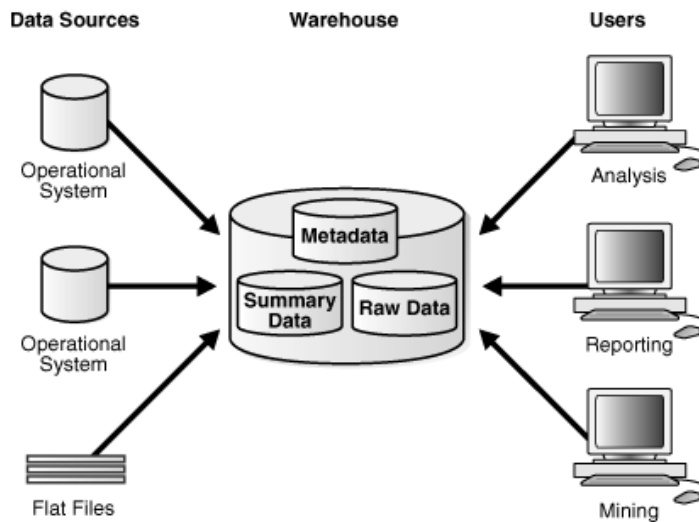


Figura 6-13 Ejemplo de arquitectura de Data Warehouse. [61]

6.6 SMARCITIES O CIUDADES INTELIGENTES

En este apartado presentamos el proceso de transformación denominado “SmartCities” o ciudades inteligentes en relación su acción favorecedora de la implantación de modelos de dispersión.

Presentamos el concepto SmartCities o “Ciudades digitales” como proceso de transformación debido a que supone la evolución, utilizando como base las nuevas tecnologías, hacia ciudades más “eficientes” o ciudades más sostenibles.

Podríamos definir una SmartCity o “ciudad inteligente” como aquella ciudad que aplica las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) con el objetivo de proveerla de una infraestructura que garantice y provea:

- Un desarrollo sostenible.
- Un incremento de la calidad de vida de los ciudadanos.
- Una mayor eficacia de los recursos disponibles.
- Una participación ciudadana activa.
- Un acceso universal a información de todo tipo relacionada con la ciudad y de su entorno.

Para dotar de un marco normativa con base en estándares normalizados, se ha constituido el Comité Técnico de Normalización 178 en AENOR (Asociación Española de Normalización, UNE), dedicado a la elaboración del conjunto de normas con cobertura en el espectro de interés de las SmartCities o Ciudades Inteligentes.

La Figura 6-14 muestra el resumen de presentación del Comité Técnico de Normalización 178 en la página web de AENOR.

Comité	AEN/CTN 178 - CIUDADES INTELIGENTES
Secretaría	UNE
Campo de Actividad	<p>Normalización de:</p> <p>Los requisitos, directrices, técnicas, indicadores y herramientas que contribuyan al desarrollo de las comunidades hacia comunidades inteligentes, cubriendo el concepto de comunidad a cualquier unidad finita de una entidad local.</p> <p>Con exclusión de:</p> <p>Los productos y equipamientos competencia de otros AEN/CTN ya constituidos.</p>
Relaciones Internacionales	<p>ISO/JTC1/WG 11 Ciudades inteligentes</p> <p>ISO/TC 268 Desarrollo sostenible en las ciudades</p> <p>IEC/SYCSMART_CITIES Aspectos electrotécnicos de las ciudades inteligentes</p> <p>CEN/CLC/SSCCCG</p>

Figura 6-14 Comité Técnico de Normalización (CTN) 178 Ciudades Inteligentes.
[66]

El Comité Técnico de Normalización CTN178 se estructura en 5 subcomités tal como se muestra en la Figura 6-15.

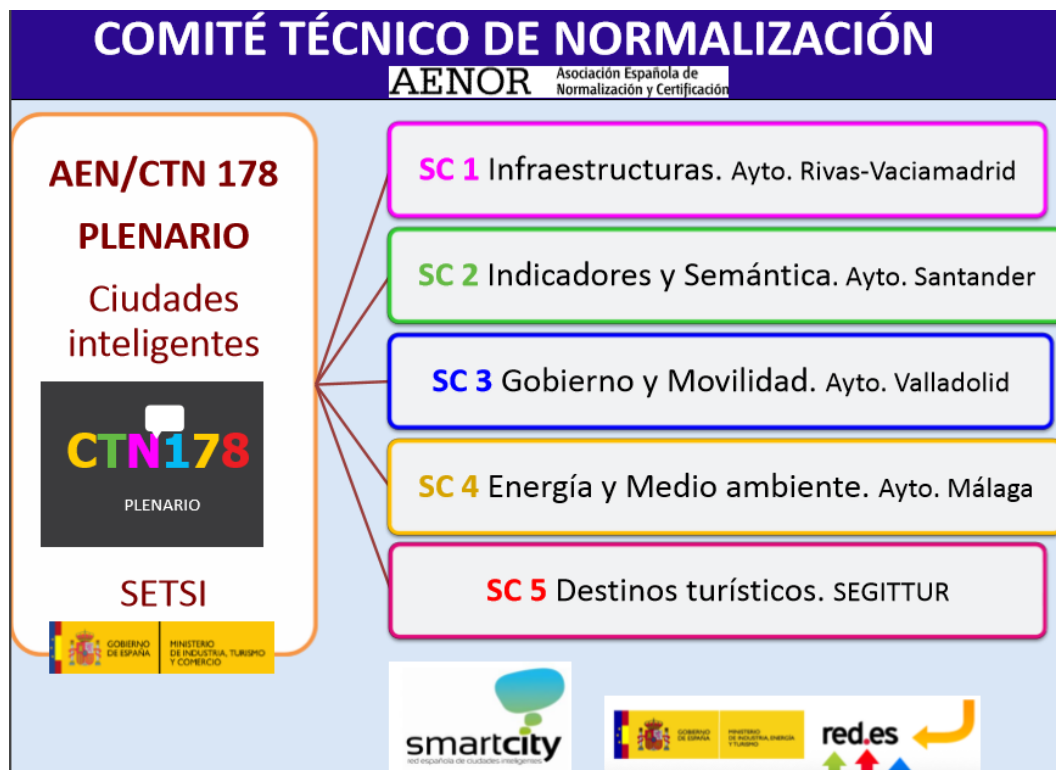


Figura 6-15 Estructura de subcomités del Comité Técnico de Normalización 178.
[66]

El sub-comité que aborda los temas relacionados con el medio ambiente y de mayor cercanía al tema principal de este trabajo, es el sub-comité 4 (SC4), cuyo plan de trabajo incluye varios proyectos de norma tal como se muestra en la Figura 6-16 adjunta.

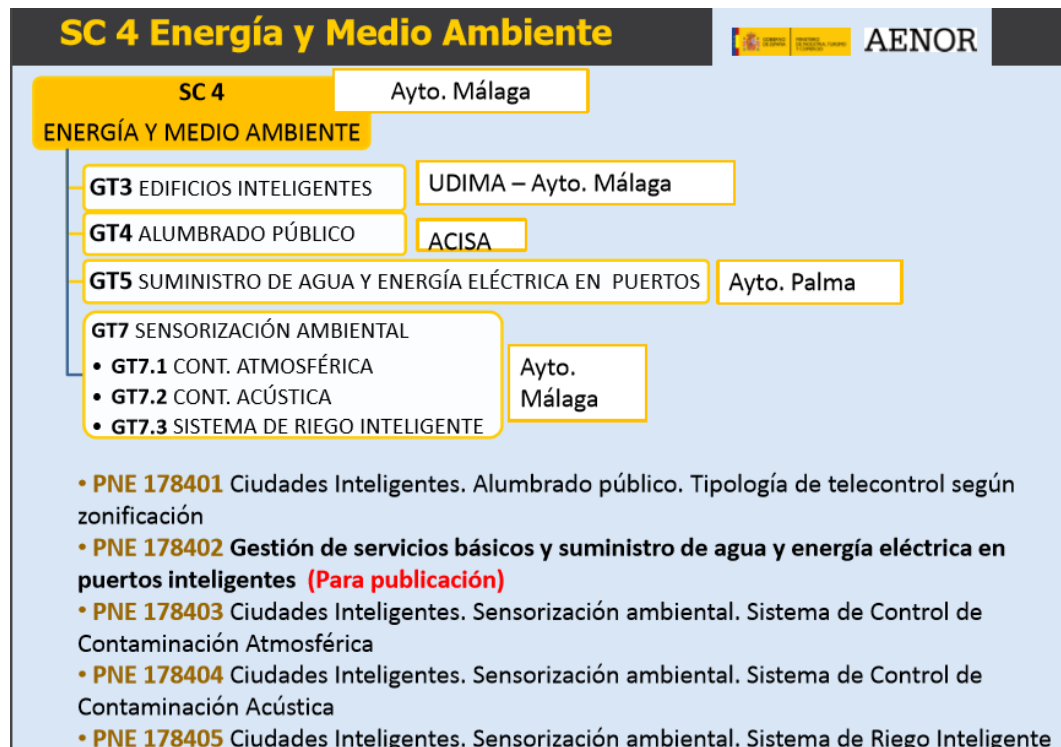


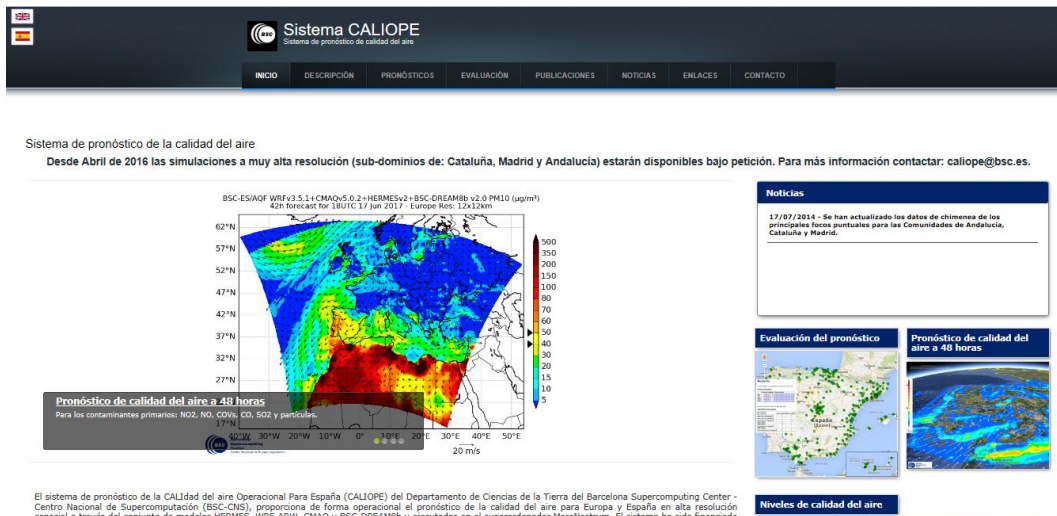
Figura 6-16 Subcomité 4 (SC4) del CTN 178 y su plan de proyectos de norma. [66]

La Figura 6-17 muestra el esquema de relaciones internacionales del CTN 178.

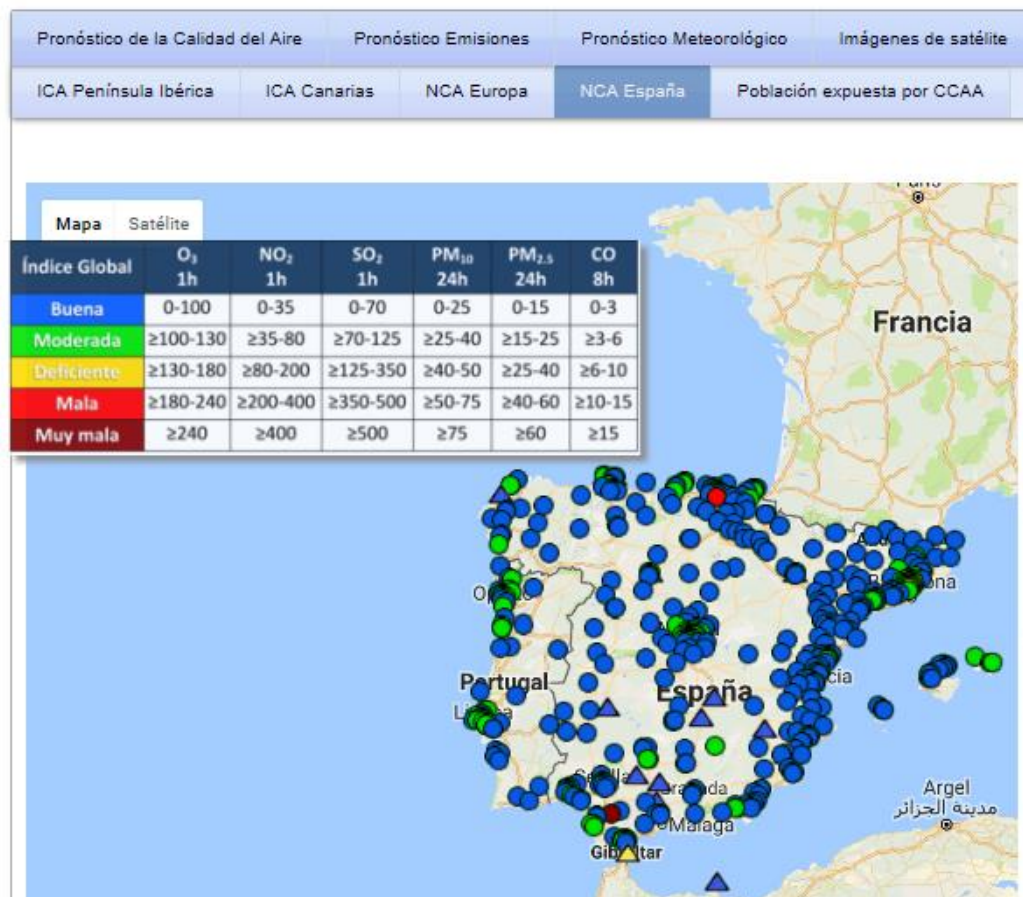


Figura 6-17 Relaciones internacionales del CTN 178. [66], [67], [68], [69]

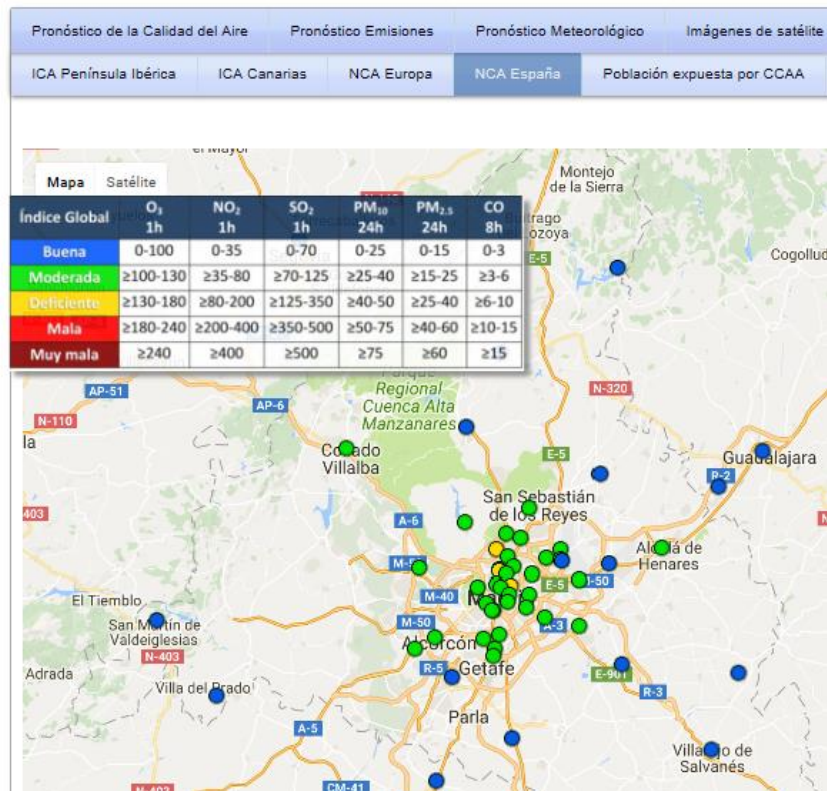
Uno de los objetivos de las ciudades inteligentes es el acceso universal a información de todo tipo, relacionada con la ciudad y de su entorno. Como ejemplo ilustrativo de la información en la *Figura 6-18* se muestran ejemplos de información de calidad del aire proporcionados por el sistema CALIOPE (Sistema de pronóstico de calidad del aire).



Pronósticos



Pronósticos



Pronósticos

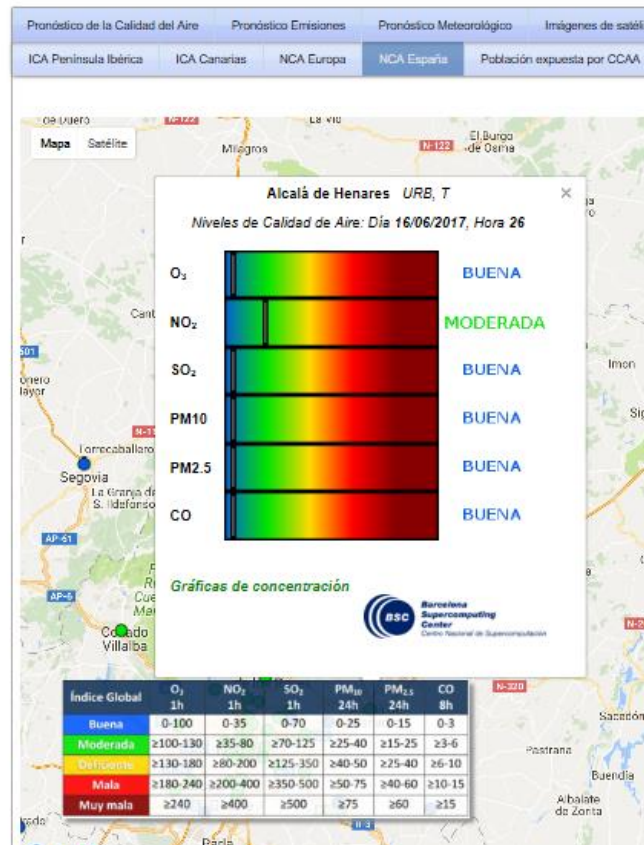


Figura 6-18 Sistema CALIOPE de información de calidad del aire. [70]

El número de ciudades que se presenta como “ciudades inteligentes” crece continuamente aunque los servicios que ofrecen son bastantes dispares, muy probablemente hasta que el proceso de estandarización y la base normativa alcance una base crítica que desencadene la homogenización de servicios.

La asociación “Red Española de Ciudades Inteligentes” tiene por objeto la generación de una dinámica entre ciudades con el fin de disponer de una "red Española de ciudades inteligentes". Las cuales han de promover la gestión automática y eficiente de las infraestructuras y los servicios urbanos, así como la reducción del gasto público y la mejora de la calidad de los servicios, consiguiendo de este modo atraer la actividad económica y generando progreso. La asociación tiene como objetivos: intercambiar experiencias y trabajar conjuntamente para desarrollar un modelo de gestión sostenible y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, incidiendo en aspectos como el ahorro energético, la movilidad sostenible, la Administración electrónica, la atención a las personas o la seguridad.

La Figura 6-19 muestra la página web de la asociación “Red Española de Ciudades Inteligentes” y la Figura 6-20 muestra el mapa de las ciudades adheridas a la fecha de elaboración del trabajo.



Figura 6-19 Página web de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI). [71]

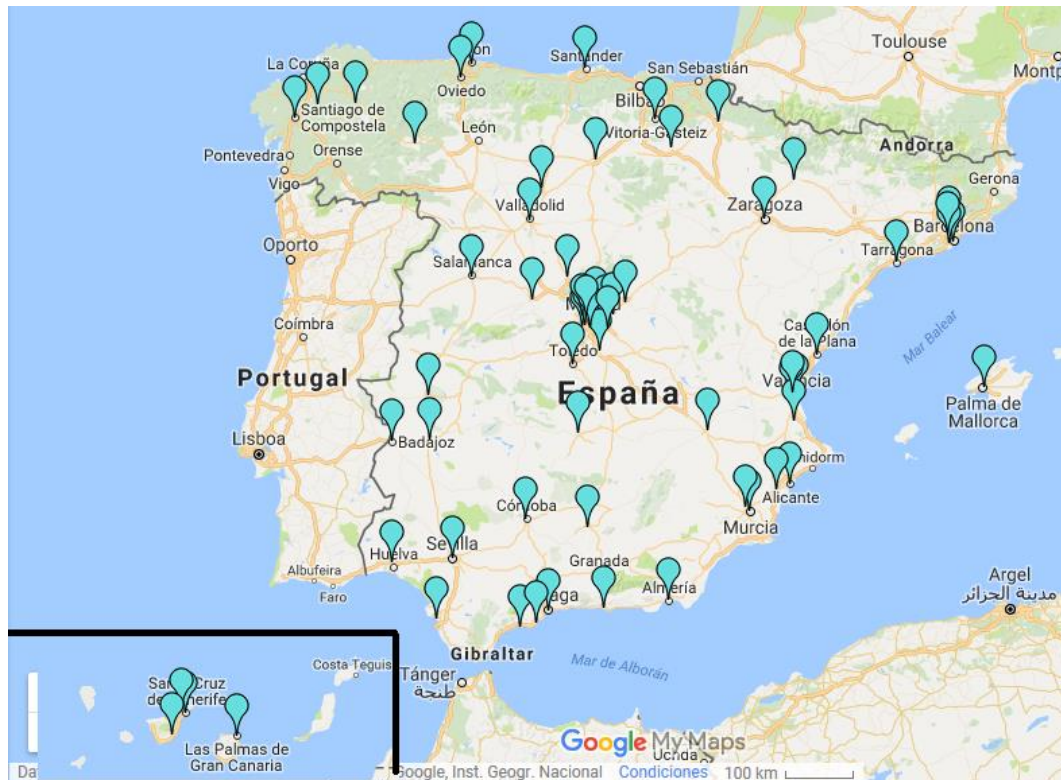


Figura 6-20 Mapa de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI). [71]

6.7 PAQUETES Y PROGRAMAS COMERCIALES

En este apartado, se presentan, a modo ilustrativo y no exhaustivo, algunos los principales programas y paquetes comerciales de modelos de dispersión.

Algunos de estos programas se utilizan en simulaciones standalone y también se integran en el control de planta mediante un API (Application Programming Interface) y otros se utilizan solamente en simulaciones de modelos de dispersión y calidad del aire.

6.7.1 Lakes Environmental Software

La compañía canadiense Lakes Environmental Software [25] está especializada en paquetes de análisis medioambiental y dispone de un amplio catálogo de programas de uso comercial para modelos de dispersión, cumplimiento de legislación, análisis de emergencias (escapes), gestión de emisiones y análisis de riesgos.

La Figura 6-21 muestra la página web de la compañía Lakes Environmental Software.



Figura 6-21 Página web de Lakes Environmental Software. [25]

6.7.2 ARIA Technologies

La compañía francesa ARIA Technologies, dispone de amplio catálogo de paquetes de software para: análisis de impacto ambiental incluyendo presentación 3D, estudios de desarrollo de ciudades, análisis de riegos, simulación y monitorización de emisiones con modelos de dispersión, estudios de impacto de edificación, estudios de calidad del aire, servicios de datos de viento y cartografía asociada, estudios de impacto regional y visualización avanzada de datos de simulaciones.

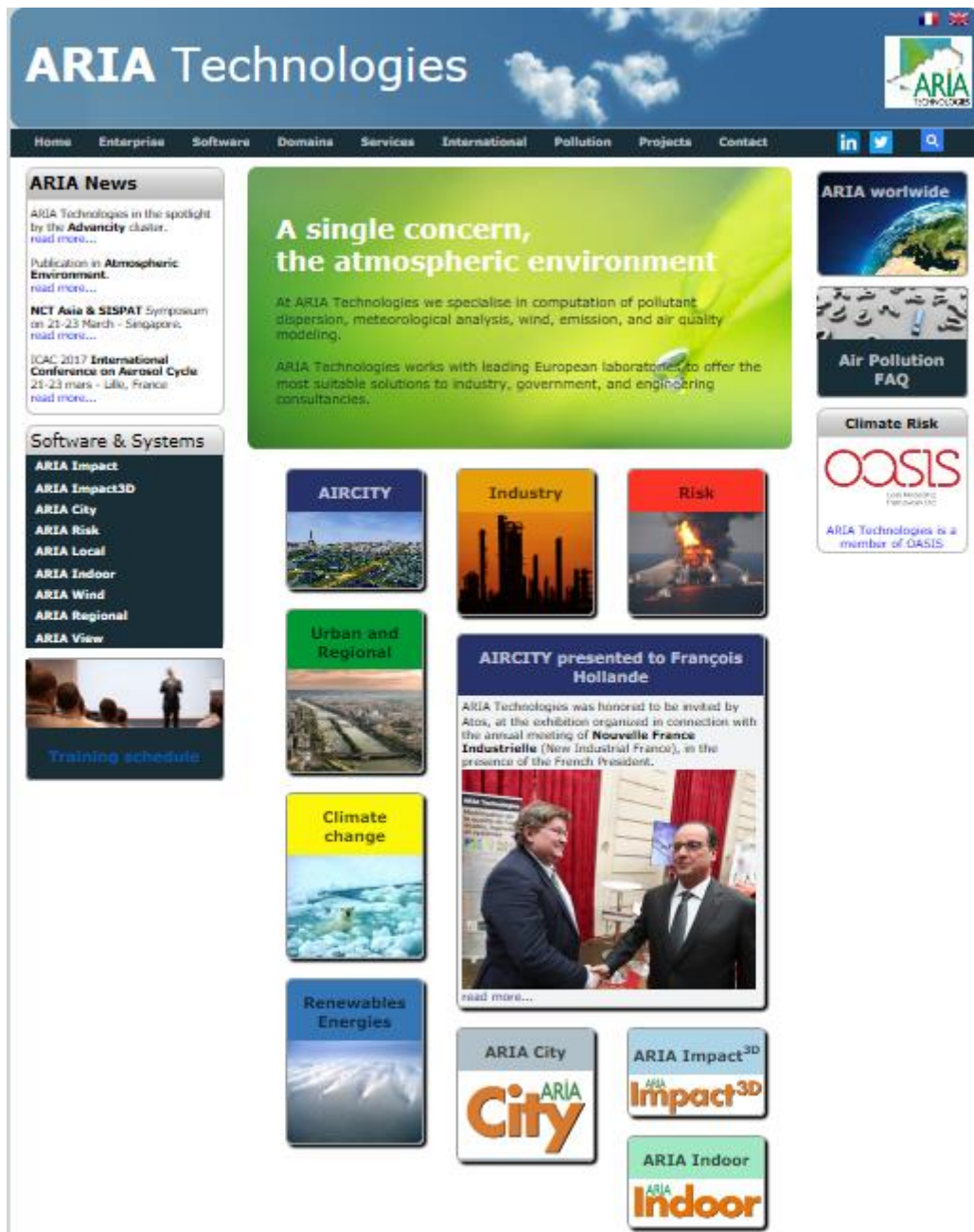


Figura 6-22 Página web de ARIA Technologies. [36]

6.7.3 Canarina Software Ambiental

La compañía española Canarina Software Ambiental, ha desarrollado software de análisis de dispersión en el aire, análisis de impacto ambiental del ruido, análisis difusores marinos y contaminación marina y análisis de radiación de antenas (densidad de potencia radiada).

La Figura 6-23 muestra la página web de Canarina Software Ambiental.



Figura 6-23 Página web de Canarina Software Ambiental. [72]

6.7.4 Providence Engineering and Environmental Group LLC

La compañía estadounidense Providence / Oris está compuesta de tres divisiones: Oris Services, BEE-Line Software (Oris-solutions) y Enviromod Training. La división de Oris Services provee servicios de consultoría para el modelo AERMOD, servicios de análisis meteorológico y consultoría de calidad del aire. La división de BEE-Line Software (Oris-solutions) ofrece: una suite de software de análisis de modelos (AERMOD, ISC3, etc.) y calidad del aire, modelo AerScreen, modelo CalPuff, modelo Inpuff2, modelo Screen3, análisis de accidentes y análisis de emergencias. Por último la división Enviromod Training ofrece servicios de formación en el modelo AERMOD con varios niveles de profundidad.

La Figura 6-24 muestra la página web de la división Oris-Solutions.

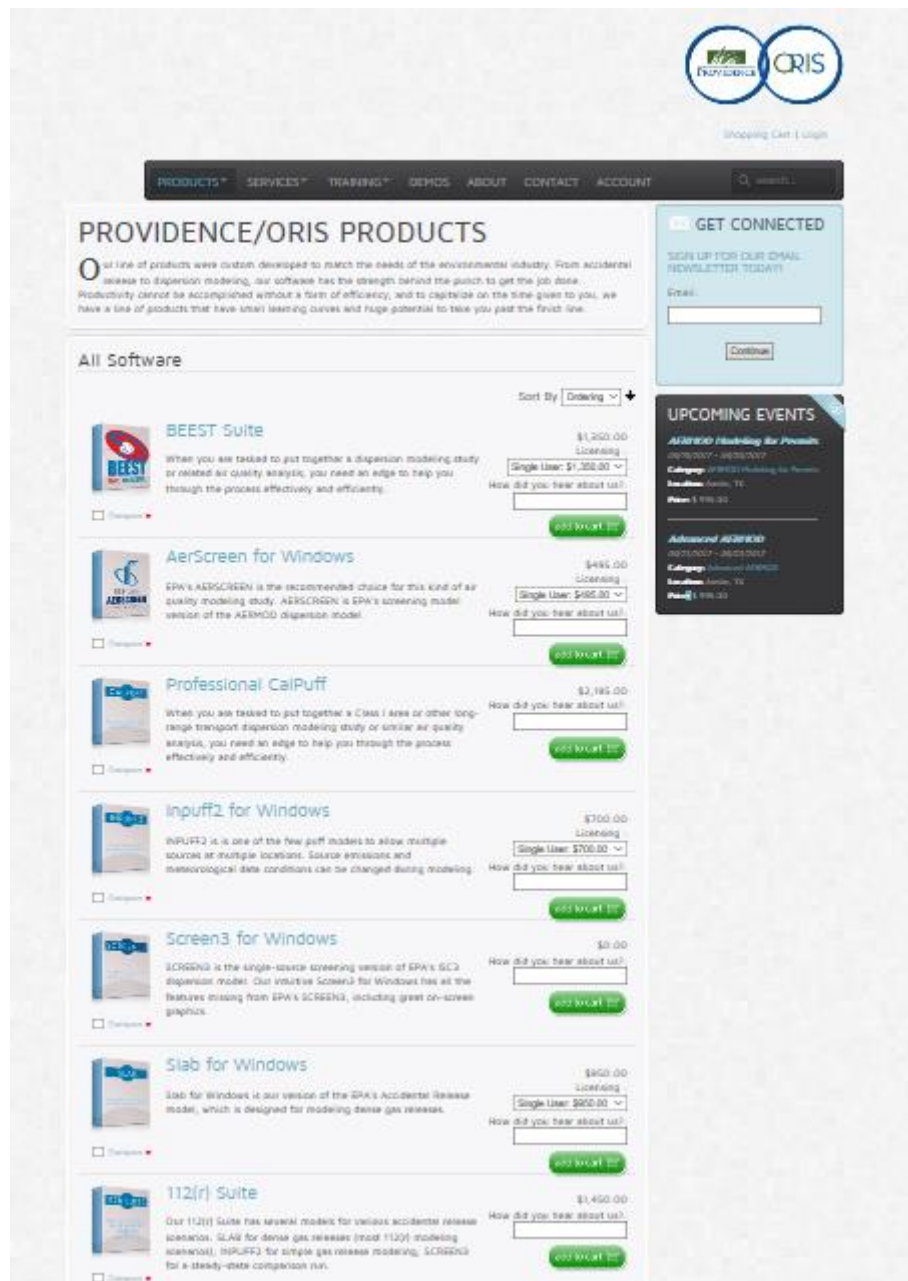


Figura 6-24 Página web de la división Oris-Solutions. [73]

6.7.5 Gexcon AS

La compañía noruega Gexcon AS ha desarrollado el software FLACS que permite simular utilizando un modelo de cálculo de dinámica de fluidos, las emisiones de gases inflamables y/o tóxicos. El modelo FLACS ha sido presentado en el capítulo 3.7 del presente trabajo.

La Figura 6-25 muestra la página web Gexcon AS en el apartado que presenta el software FLACS.

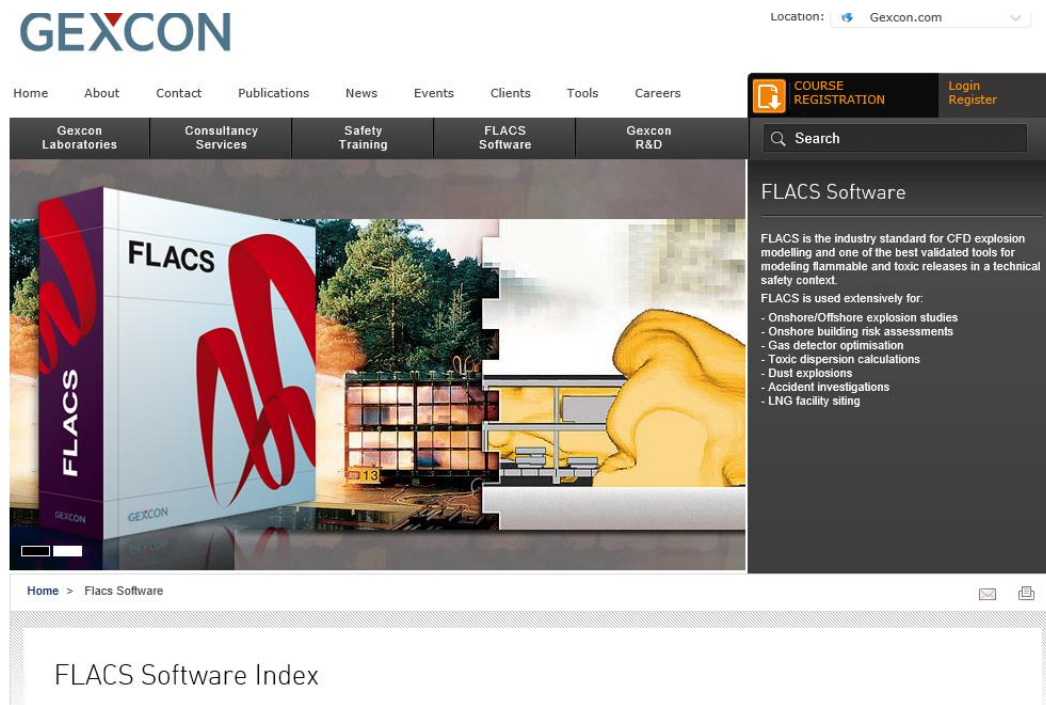


Figura 6-25 Página web de Gexcon presentando software FLACS. [28]

6.8 MARCO LEGISLATIVO Y LEGISLACIÓN APLICABLE

Este apartado se presenta el marco legislativo y la legislación aplicable a las emisiones a la atmósfera y a la calidad del aire. El marco legislativo general es más amplio y aplica a la totalidad de emisiones y en todos los medios, sin embargo debido a razones de cercanía al tema principal del trabajo, presentaremos únicamente las relativas a las emisiones a la atmósfera y calidad del aire.

Una gran parte del marco legislativo español actual aplicable a las emisiones y calidad del aire proviene de la adopción de directivas europeas por parte de España.

La principal directiva o paraguas legislativo lo constituye el marco “Prevención y control integrado de la contaminación: IPPC (International Plant Protection Convention)”.

El Reglamento EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) o “Reglamento Comunitario de Ecogestión y Ecoauditoría”, es el Sistema Comunitario de Gestión Medioambiental cuya implantación asegura el cumplimiento de las exigencias de la Ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC).

El marco legislativo de la IPPC en España está constituido por las siguientes leyes:

- Texto refundido de la Ley 16/2002 de prevención y control integrado de la contaminación. La ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación ha sido modificada en diversas ocasiones. La última de ellas por la Ley 5/2013 de 11 de junio que transpone, en parte, la Directiva de Emisiones Industriales 2010/75/UE, anteriormente lo había sido por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las modificaciones introducidas por las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE) y, por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad y por la Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera. Con el texto refundido se integran en un único texto la Ley 16/2002 y sus sucesivas modificaciones, así como las disposiciones en materia de emisiones industriales contenidas en normas con rango de ley.
- Real Decreto 815/2013 por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y desarrollo de la Ley 16/2002. El Real Decreto desarrolla la Ley 16/2002, de 1 de julio de prevención y control integrado de la contaminación, y completa a su vez la transposición de los preceptos de carácter técnico de la Directiva 2010/75/UE a nuestro acervo legislativo. Mediante este Real Decreto, se aprueba el Reglamento de emisiones industriales, cuyo objetivo es desarrollar y ejecutar la Ley 16/2002, así como establecer el régimen jurídico aplicable a las emisiones industriales, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto. Asimismo, establece las disposiciones para evitar y, cuando ello no sea posible, reducir la contaminación provocada por las instalaciones del anejo 1, en particular las de incineración y co-incineración de residuos, las grandes instalaciones de combustión y las instalaciones que producen dióxido de titanio.

- Orden PRA/321/2017, de 7 de abril, por la que se regulan los procedimientos de determinación de los contaminantes atmosféricos SO_2 , NO_x , partículas y CO procedentes de las GIC, el control de los instrumentos de medida y el tratamiento y remisión de la información relativa a dichas emisiones. Esta Orden regula los procedimientos de determinación de las emisiones de los contaminantes atmosféricos SO_2 , NO_x y partículas procedentes de las grandes instalaciones de combustión, así como el control de los instrumentos de medida. La orden se aplica a las grandes instalaciones de combustión. Asimismo, la Orden establece las disposiciones necesarias para que los titulares de las grandes instalaciones de combustión informen en los plazos determinados, tanto de los resultados de las mediciones como de las emisiones resultantes y demás datos precisos para su determinación, así como del control de los equipos de medida y de las operaciones de medición necesarias para la consecución de dichas mediciones.

Las competencias de vigilancia medioambiental en España están transferidas a las Comunidades Autónomas, por lo que la infraestructura y publicación de los datos legislación puede ser ligeramente entre Comunidades Autónomas.

Las grandes instalaciones con focos de emisión continuos o estacionarios, están permanente conectadas a la red de vigilancia medioambiental de la Comunidad Autónoma.

La Figura 6-26 muestra, a modo de ejemplo, el mapa de la red de vigilancia ambiental de la comunidad autónoma de Castilla – La Mancha.



Figura 6-26 Mapa de la Red Pública de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Castilla-La Mancha. [74]

La Figura 6-27 muestra los datos registrados por la estación medio ambiental de Guadalajara perteneciente a la red de vigilancia ambiental de la comunidad autónoma de Castilla – La Mancha.

Datos de calidad del aire correspondientes a:

Estación de Guadalajara



Fecha de los datos: 16-junio-2017 20:00

Ultimas medias horarias obtenidas:

Contaminante	Valor
Partículas en suspensión (PM10)	27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de Azufre (SO ₂)	3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Monóxido de nitrógeno (NO)	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Monóxido de carbono (CO)	0,40 mg/m^3
Ozono (O ₃)	94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Estos son datos temporales pendientes de validación.

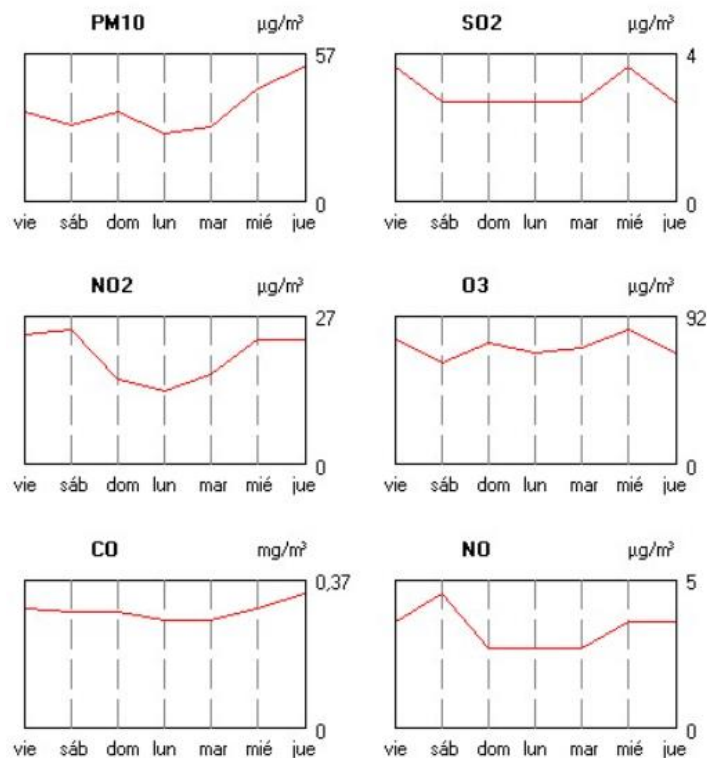


Figura 6-27 Datos registrados por la estación de Guadalajara el 16/06/2017. [74]

6.9 EJEMPLO DE EJECUCIÓN DE MODELO

A efectos meramente ilustrativos de la ejecución de un modelo de dispersión, en este apartado se muestra una simulación de una emisión de partículas de una fuente ficticia (y por lo tanto inexistente) que hemos situado en el patio de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá.

Se simula la emisión desde una altura de 8 a 10 metros, de una cantidad de partículas de 15 mg durante un tiempo de emisión de 2 horas.

El modelo utilizado en la simulación ha sido HYSPLIT² (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) [32], un modelo que ya ha sido presentado en este trabajo en el apartado 3.9 y con posibilidad de ejecución Online.

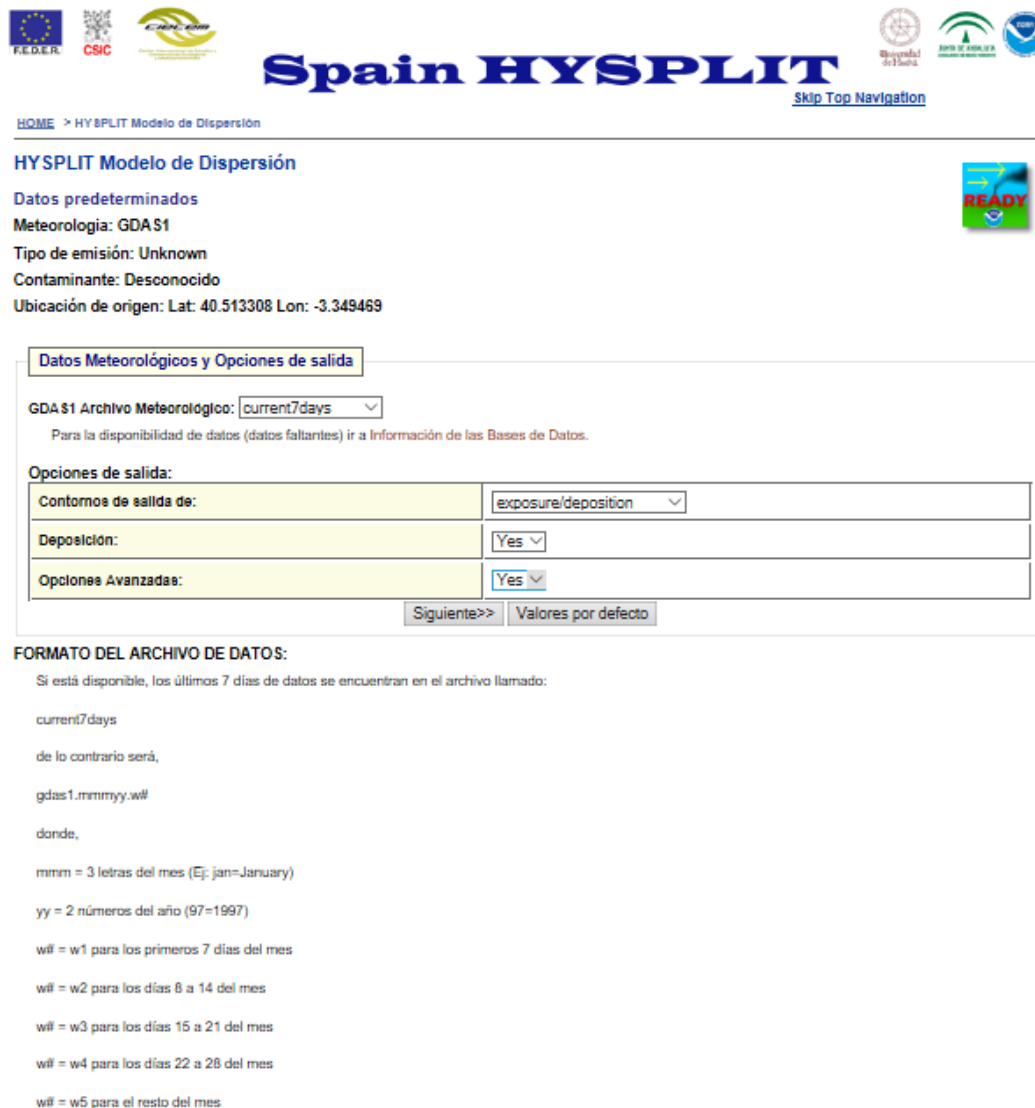
La Figura 6-28 muestra la configuración de la ubicación de la fuente ficticia de emisión, en el patio del edificio Politécnico, utilizando el modelo HYSPLIT y presentación con programa de visualización cartográfica Google Earth.



² Reconocimiento: El autor agradece a la NOAA Air Resources Laboratory (ARL) por la prestación del modelo de transporte y dispersión de HYSPLIT, así como al portal web SPAIN HYSPLIT (<http://www.ciecem.uhu.es/hysplit>) utilizados en esta publicación.

Figura 6-28 Ubicación de la fuente supuesta utilizada en la simulación. [31] [75]

La Figura 6-29 muestra la configuración de los datos meteorológicos y las opciones de salida, la Figura 6-30 muestra la configuración de datos de la fuente y opciones avanzadas y por último en la Figura 6-31 se muestran los resultados de la simulación en forma de gráficas y visualizados sobre cartografía con el visualizador Google Earth [75].



The screenshot shows the 'Spain HYSPLIT' web application interface. At the top, there are logos for FEDER, CSIC, and other institutions. The main title is 'Spain HYSPLIT' with a 'Skip Top Navigation' link. Below the title, the page is titled 'HYSPLIT Modelo de Dispersión'. The 'Datos predeterminados' section shows 'Meteorología: GDAS1', 'Tipo de emisión: Unknown', 'Contaminante: Desconocido', and 'Ubicación de origen: Lat: 40.513308 Lon: -3.349469'. A 'READY' button is visible on the right. The 'Datos Meteorológicos y Opciones de salida' section contains a dropdown for 'GDAS1 Archivo Meteorológico' set to 'current7days'. A note states: 'Para la disponibilidad de datos (datos faltantes) ir a Información de las Bases de Datos.' Below this, the 'Opciones de salida' section has three rows: 'Contornos de salida de:' with a dropdown set to 'exposure/deposition', 'Deposición:' with a dropdown set to 'Yes', and 'Opciones Avanzadas:' with a dropdown set to 'Yes'. At the bottom of this section are 'Siguiente>>' and 'Valores por defecto' buttons. The 'FORMATO DEL ARCHIVO DE DATOS:' section explains the file naming convention: 'Si está disponible, los últimos 7 días de datos se encuentran en el archivo llamado: current7days de lo contrario será, gdas1.mmmmyy.w# donde, mmm = 3 letras del mes (Ej: jan=January) yy = 2 números del año (97=1997) w# = w1 para los primeros 7 días del mes w# = w2 para los días 8 a 14 del mes w# = w3 para los días 15 a 21 del mes w# = w4 para los días 22 a 28 del mes w# = w5 para el resto del mes'.

Figura 6-29 Configuración de datos meteorológicos y opciones de salida. [31]

Spain HYSPLIT

HOME -> HYSPLIT Modelo de Dispersión

HYSPLIT Modelo de Dispersión

Detalles del modelo de Ejecución

Tipo de emisión: Unknown

Ubicación de origen: Lat: 40.513333 Lon: -3.349444

Término de origen: User Entered - 1 max

Meteorología: CUAS1

Salida: Ejecución/Deposición

El archivo CUAS1 contiene los datos de 0000 UTC 5/22/17 hasta 0000 UTC 11/03/14.

Cambiar los parámetros por defecto y Opciones de Visualización

Parámetros término fuente

Hora de inicio (UTC):	Ayuda	Min: 17	Max: 05	Day: 22	Month: 05
Latitud de origen:	Ayuda	40.513333 grados			
Longitud de origen:	Ayuda	-3.349444 grados (Dejar en negativo)			
Topo de emisión:	Ayuda	10 metros AGL			
Fondo de emisión:	Ayuda	5 metros AGL			
Cantidad de emisión:	Ayuda	15	mg		
Duración de emisión:	Ayuda	2	hora(s)		

Parámetros de Ejecución

Duración Total:	Ayuda	1	hora(s)
Periodo medio / intervalo de salida:	Ayuda	1	hora(s)
Principio de la capa media:	Ayuda	101	metros AGL (deben ser >= 100m)
Final de la capa media:	Ayuda	500	metros AGL
Contorno multiplicador:	conversiones	Ayuda	1.0E+00

Parámetros de deposición

Características de contaminantes:	Ayuda	<input checked="" type="radio"/> Particle <input type="radio"/> Gas
Velocidad de deposición seca (meters/second):	Ayuda	0.001
Constante de Henry para la deposición húmeda de un gas:	help	0.0
Deposición húmeda de partículas: In-cloud (LL) and below-cloud (1/s):	help	0.0
Suma de deposición de ejecución total:	help	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Radioactive decay half-life (days):	help	0
Contour multiplier:	conversiones	help

Advanced Options (SETUP.CFG - See the HYSPLIT User's Guide)

Number of Particles or Puffs Released (NUNPAR):	500
Maximum Number of Particles (MAXPAR):	10000
Particles Dump Interval (hours):	1
Model Run Type (INITD):	<input checked="" type="radio"/> Horizontal and Vertical Particle (H) <input type="radio"/> Horizontal Top-Hat Puff, Vertical Particle (H) <input type="radio"/> Horizontal Gaussian Puff, Vertical Top Hat Puff (H) <input type="radio"/> Horizontal and Vertical Top Hat Puff (H) <input type="radio"/> Horizontal Gaussian Puff, Vertical Particle (H) <input type="radio"/> Auto switch from INITD=0 to INITD=3 <input type="radio"/> Auto switch from INITD=0 to INITD=4
Turbulence Computational Method (ISOT):	<input type="radio"/> Short Range: Horizontal and vertical velocity variances (H) <input type="radio"/> Short Range/No Fluxes: Same as ISOT=1, but will not use model fluxes (H) <input checked="" type="radio"/> Standard: Vertical diffusivity and horizontal deformation (H) <input type="radio"/> Input TKC: Turbulence based upon input meteorology TKC (H) <input type="radio"/> Variances: Velocity variances from input meteorology (H)

Parámetros de salida

Trama de resolución (dpi):	Ayuda	95
Factor de enfoque:	Ayuda	70
Superposición círculo de distancia:	Ayuda	<input type="radio"/> Ninguna <input checked="" type="radio"/> Auto <input type="radio"/> 4 círculos separados por 5 km
¿Límites del registro de EE.UU.?	Ayuda	<input type="radio"/> Si <input checked="" type="radio"/> No
¿Salida de los SIG de los contornos?	Ayuda	<input type="radio"/> Ninguna <input type="radio"/> GIS Shapefiles <input checked="" type="radio"/> Google Earth (kmz)
¿Archivo PostScript?	Ayuda	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No
¿Crear archivo PDF de gráficos?	Ayuda	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No

Ejecución Modelo Dispersión | Volver por Defecto

Figura 6-30 Configuración de datos de la fuente y opciones avanzadas. [31]



Spain HYSPLIT


[Skip Top Navigation](#)
[HOME](#) > HYSPLIT Modelo Dispersión

HYSPLIT Modelo Dispersión



RESULTADOS DEL MODELO HYSPLIT PARA EL IDENTIFICADOR 24583

Estado: Sun Jun 25 13:53:05 CEST 2017
 El modelo y los gráficos están ahora completos.
 Finalizada la generación de graficos para la ejecución 24583.
 Creando toa fichero PDF
 Crear archivo PDF de partículas
 Crear archivo PDF deposición

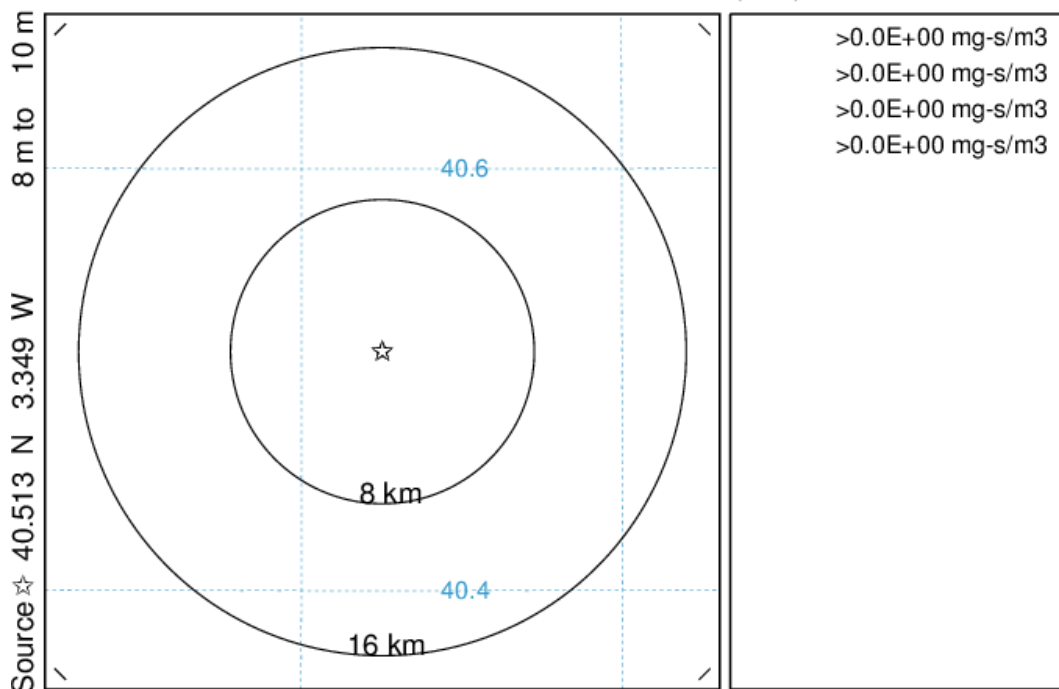
RESULTADOS	Haga clic en el enlace de texto para ver los gráficos en una ventana nueva.			
	GIF Plots	PostScript Plots	PDF Plots	Google Earth Plots
Concentración	GIF	PS	PDF	KMZ
Deposicion	GIF	PS	PDF	
Posición de partículas	GIF	PS	PDF	-

NOAA HYSPLIT MODEL

Exposure (mg-s/m3) averaged between 0 m and 101 m

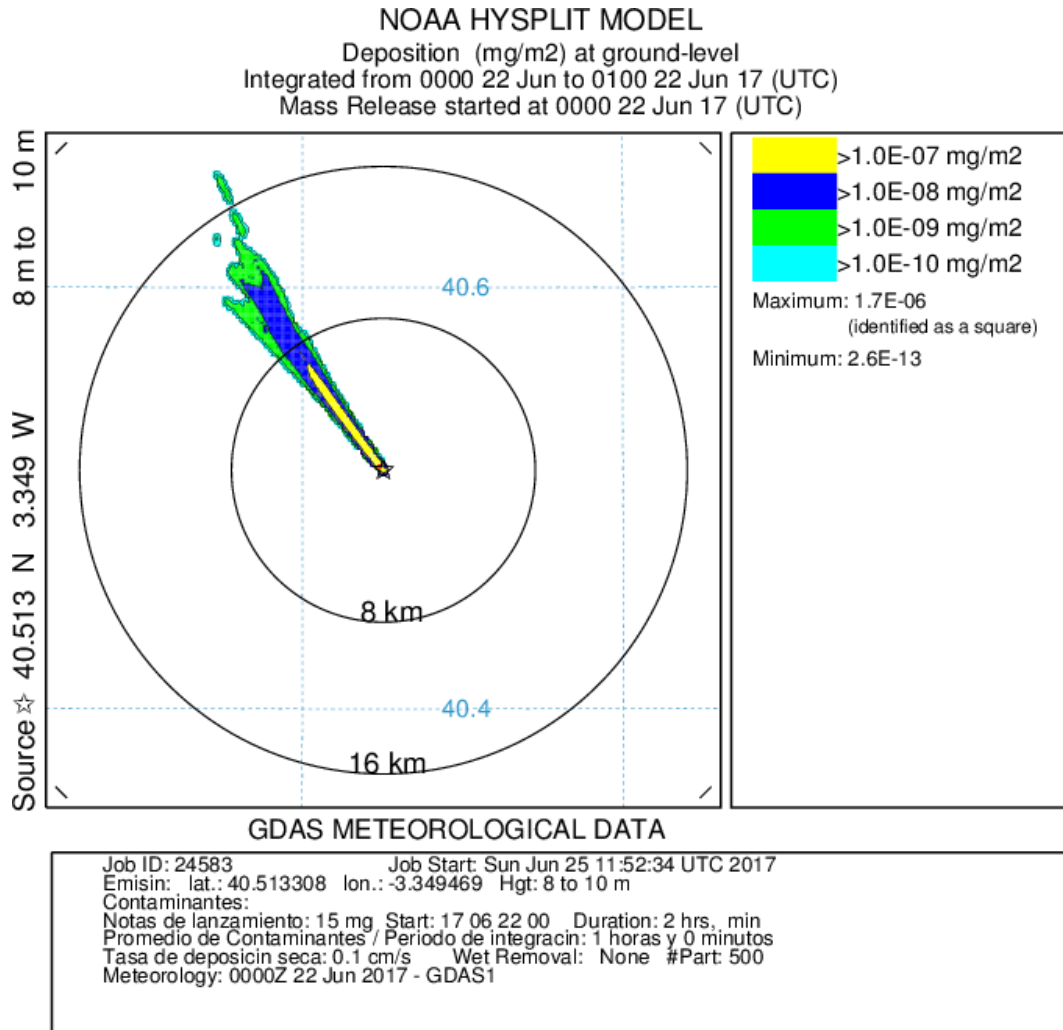
Integrated from 0000 22 Jun to 0100 22 Jun 17 (UTC)

Mass Release started at 0000 22 Jun 17 (UTC)

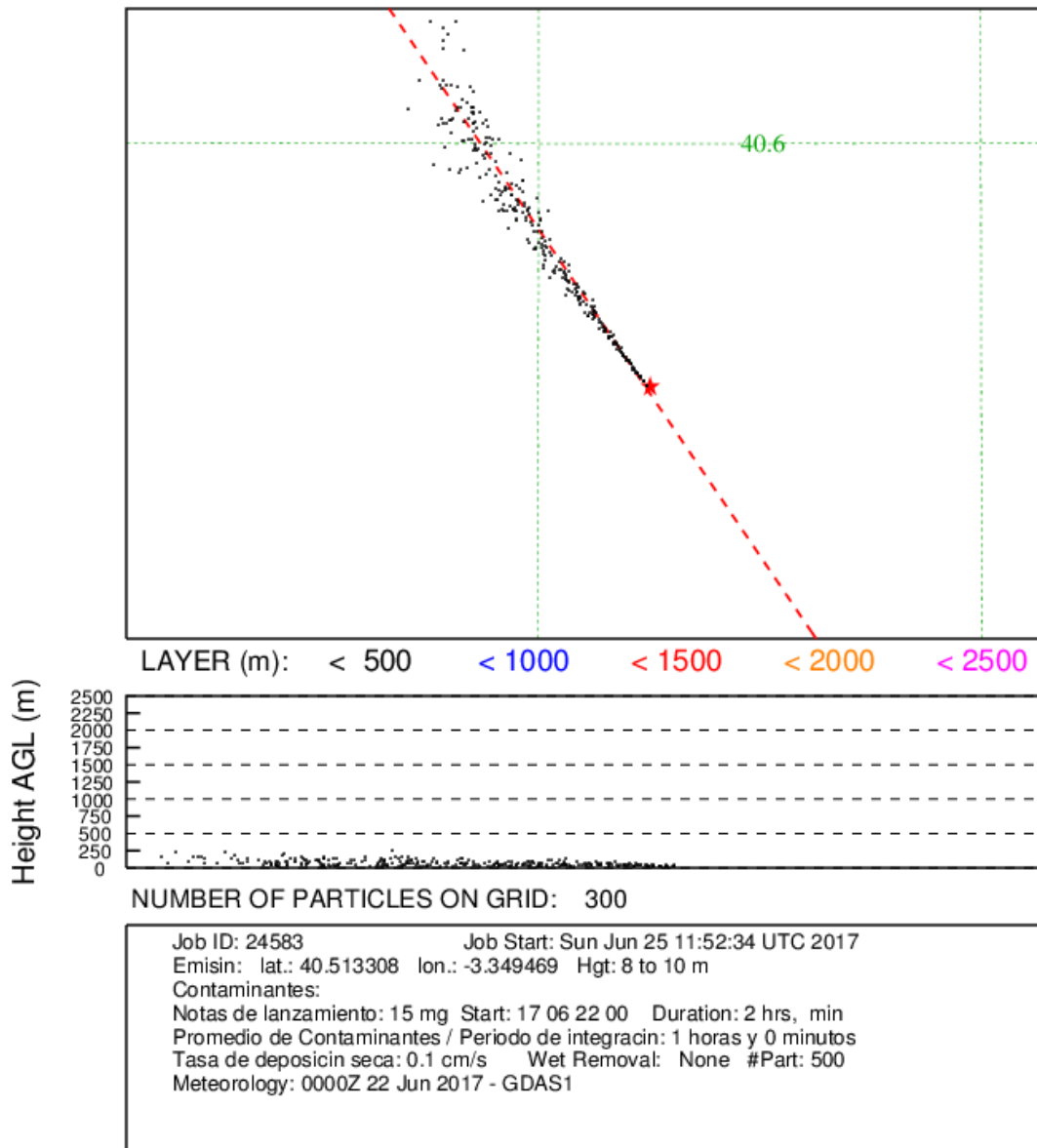


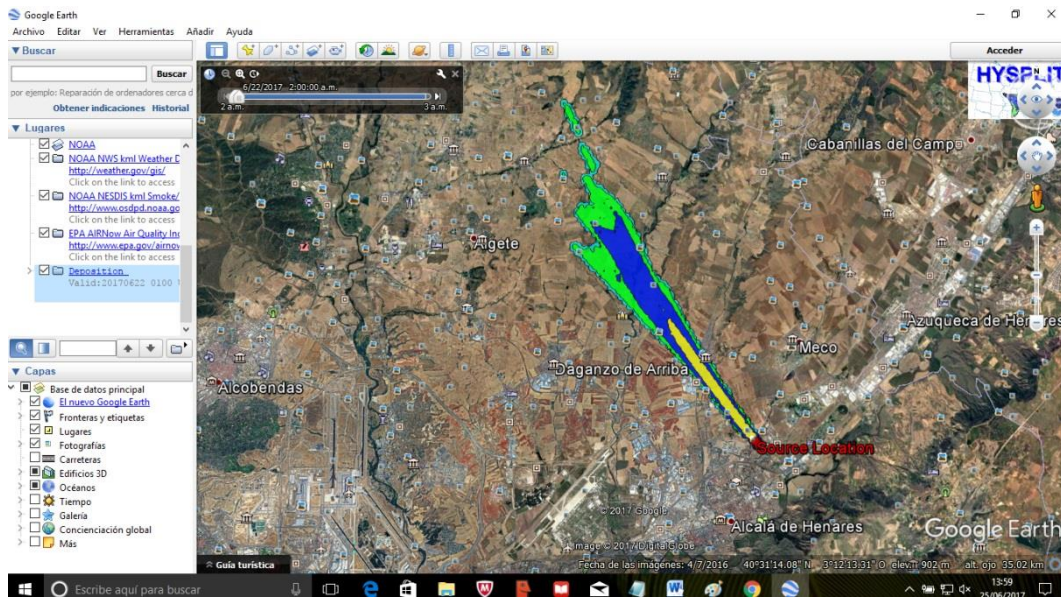
GDAS METEOROLOGICAL DATA

Job ID: 24583 Job Start: Sun Jun 25 11:52:34 UTC 2017
 Emissin: lat.: 40.513308 lon.: -3.349469 Hgt: 8 to 10 m
 Contaminantes:
 Notas de lanzamiento: 15 mg Start: 17 06 22 00 Duration: 2 hrs. min
 Promedio de Contaminantes / Periodo de integracin: 1 horas y 0 minutos
 Tasa de deposicin seca: 0.1 cm/s Wet Removal: None #Part: 500
 Meteorology: 0000Z 22 Jun 2017 - GDAS1



NOAA HYSPLIT MODEL PARTICLE CROSS-SECTIONS PARTICLE POSITIONS AT 01 UTC 22 Jun 17





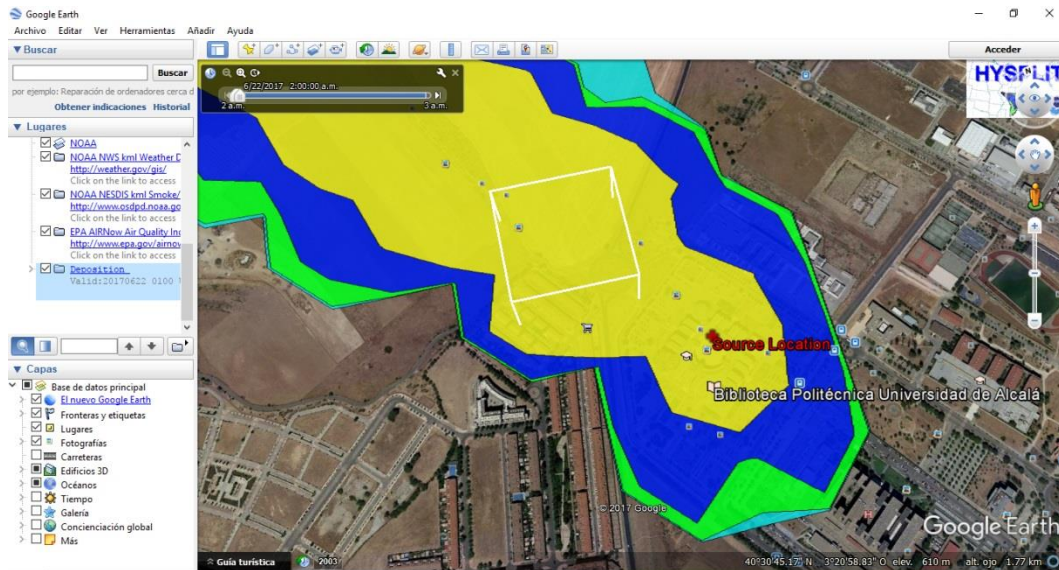


Figura 6-31 Resultados gráficos de la simulación y visualización de resultados sobre cartografía. [31], [75]

Como se puede observar en la Figura 6-31, según los resultados de la simulación se producen deposiciones de partículas hasta una distancia superior a los 16 km de distancia desde la fuente. Sin embargo las deposiciones que superan los $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^2$ no llegan a alcanzar los 8 km desde la fuente.

Como se observa en las gráficas y en las visualizaciones sobre cartografía GIS, el área afectada por las deposiciones de la emisión está muy condicionada por la dirección del viento (dirección norte-noroeste) que evita que el núcleo urbano de Alcalá de Henares resulte afectado. El área afectada alcanza los 18.3 km de distancia desde la fuente con una anchura en su parte mayor cercana a los 3 km a la altura del municipio de Fresno de Torote. Destacar también que está afectada un área circular de unos 300 metros de radio, en todas las direcciones alrededor de la fuente de emisión con unas deposiciones mayores de $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^2$ hasta un radio de 150 metros.

7 CONCLUSIONES

La principal conclusión del presente trabajo es que el “estado del arte” de las tecnologías de los modelos de dispersión y de la tecnología de control industrial a nivel de planta, hacen factible que a nivel general se puedan aplicar los modelos de dispersión, sobre todo en lo referente a calidad del aire, para obtener mejoras en el control de planta y por tanto en sus resultados productivos.

Sin embargo esta conclusión es necesario estudiarla en cada caso particular, para llegar a la decisión de adoptar o descartar el uso de los modelos de dispersión y en su caso el enfoque de integración.

El principal objetivo con la integración de modelos de dispersión en el control de planta, es el control de emisiones ligado al cumplimiento de la legislación y la eficiencia productiva. La consecución de este objetivo debe ser confirmado en las fases de análisis antes de realizar cambios en el esquema de control de planta y de acometer fuertes inversiones.

Las nuevas tecnologías proporcionan una gran cantidad de datos que pueden mejorar el control eficiente de la planta, a costa de un aumento de la carga de proceso y que será necesario valorar en cada caso. Los datos, cada vez más numerosos, disponibles desde las nuevas infraestructuras de Smartcities sin duda pueden ser una alternativa a coste efectivo frente a la inversión en instrumentación en la planta, aunque será necesario ponderar en cada caso los riesgos asociados a la posible no disponibilidad de los datos y tener identificados planes de contingencia. Tengamos en cuenta que las infraestructuras de Smartcities hasta que se disponga de la base normativa que las homogenice pueden tener implementaciones muy dispares y en muchos casos no estar implementados en escenarios de “alta disponibilidad”.

Además de la relación ya comentada con las Smartcities, las líneas futuras de trabajo en la aplicación de modelos de dispersión, sin duda estarán ligadas principalmente a la evolución de las tecnologías de IoT y Cloud Computing incluyendo el procesado de grandes cantidades de datos fuentes heterogéneas (Big Data, Data Mining, Data Warehouse, etc.).

Otra iniciativa emergente y también con posible relación con la aplicación de modelos de dispersión es el de “Industria 4.0” o “Industry 4.0” que engloba conceptos como “SmartFactories” o “Fábricas inteligentes” que se postulan como los primeros pasos de la cuarta revolución industrial o “industria inteligente”.

En definitiva se puede concluir, que los últimos 20 años han consolidado la utilidad creciente de la aplicación de los modelos de dispersión en el ámbito de planta pero los años venideros multiplicarán las aplicaciones y cada vez será más sencilla y económica su implantación en las plantas industriales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Española de Meteorología. [Online]. www.aemet.es
- [2] Langley Flying School, Inc. [Online]. www.langleyflyingschool.com
- [3] SnowFlakes - SnowCrystals. [Online]. www.snowcrystals.com
- [4] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. [Online]. www.ciemat.es
- [5] Environmenal Protection Agency. [Online]. www.epa.gov
- [6] Germán Villar, Documentación y notas de automatización., Elaboración propia Germán Villar.
- [7] C. Donald Ahrens, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*.
- [8] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. [Online]. www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/
- [9] [Online]. www.wipp.energy.gov
- [10] Windbs. [Online]. www.windbs.net/shop/article.php?idArt=3&name=ANEMOVELETA+YOUNG+05103
- [11] DirectIndustry. [Online]. www.directindustry.com/prod/capetti-elettronica/product-36937-1840294.html
- [12] HIDRIC, S.L. [Online]. www.hidric.com
- [13] Vaisala. [Online]. www.vaisala.com
- [14] Sensovant Smart Sensing. [Online]. sensovant.com
- [15] Registro estatal de emisiones y fuentes contaminantes. [Online]. www.prtr-es.es
- [16] Sick AG. [Online]. www.sick.com
- [17] Blog InsideTheNature. [Online]. insidethenature.wordpress.com/2012/12/12/que-es-

[el-efecto-albedo-3/](#)

- [18] International Atomic Energy Agency. [Online]. www.iaea.org/
- [19] University de Lyon - Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique. [Online]. lyon-university.org
- [20] CometUcar. [Online]. www.comet.ucar.edu
- [21] SoundPLAN GmbH. [Online]. www.soundplan.eu
- [22] GexCon US. [Online]. gexconus.com
- [23] Cambridge Environmental Research Consultants. [Online]. www.cerc.co.uk
- [24] Karlsruhe Institute of Technology. [Online]. www.kit.edu
- [25] Lakes Environmental. [Online]. www.weblakes.com
- [26] Community Modeling and Analysis System (CMAS). [Online]. www.airqualitymodeling.org
- [27] SMHI. [Online]. www.smhi.se
- [28] Gexcon AS. [Online]. www.gexcon.com
- [29] Flexpart. [Online]. www.flexpart.eu
- [30] Empa. [Online]. www.empa.ch
- [31] HYSPLIT SPAIN Universidad de Huelva. [Online]. www.ciecem.uhu.es/hysplit
- [32] NOAA Air Resources Laboratory (ARL). [Online]. arl.noaa.gov
- [33] ATmospheric, Meteorological, and Environmental Technologies. [Online]. www.atmet.com
- [34] NASA Global Change Master Directory. [Online]. gcmd.nasa.gov
- [35] MetOffice. [Online]. www.metoffice.gov.uk
- [36] Aria Technologies. [Online]. www.aria.fr
- [37] Department of Environmental Science - Aarhus University. [Online]. envs.au.dk
- [38] European Environment Agency. [Online]. www.eea.europa.eu

- [39] Fluidyn. [Online]. www.fluidyn.com
- [40] Technical University of Denmark - DTU Wind Energy. [Online]. www.vindenergi.dtu.dk
- [41] Universidad de Génova - Italia. [Online]. www.fisica.unige.it
- [42] OFCM. [Online]. www.ofcm.noaa.gov
- [43] Swedish Defence Research Agency. [Online]. www.foi.se
- [44] Norwegian Defence Research Establishment. [Online]. www.ffi.no
- [45] INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. [Online]. www.actu-environnement.com
- [46] Environment Protection Authority Victoria. [Online]. www.epa.vic.gov.au
- [47] Electric Power Research Institute. [Online]. www.epri.com
- [48] B.C. Cochran, J.J. Carter R.L. Petersen, *Specifying exhaust and intake systems*.
- [49] Open Security Architecture. [Online]. www.opensecurityarchitecture.org
- [50] Industrial Ethernet Book. [Online]. www.iebmedia.com
- [51] Analog devices. [Online]. www.analog.com
- [52] Cisco. [Online]. www.cisco.com
- [53] Siemens. [Online]. www.siemens.com
- [54] Schneider Electric. [Online]. www.schneider-electric.com
- [55] Real-Time Innovations. [Online]. www.rti.com
- [56] Advantech. [Online]. www.advantech.com
- [57] Wonderware. [Online]. www.wonderware.com
- [58] Visschers Consulting. [Online]. www.visschers-consulting.com
- [59] ATS Applied Tech Systems S.L. [Online]. www.ats-global.com
- [60] SAP AG. [Online]. www.sap.com
- [61] ORACLE. [Online]. www.oracle.com

- [62] Toshiba. [Online]. www.toshiba.com
- [63] RS-Amidata. [Online]. www.rs-online.com
- [64] Brighthub. [Online]. <http://www.brighthub.com/>
- [65] Centro de Investigación en Inteligencia de Negocios. [Online]. www.ceine.cl
- [66] AENOR. [Online]. www.aenor.es
- [67] Endesa. [Online]. www.endesa.es
- [68] Iberdrola. [Online]. www.iberdrola.es
- [69] Agenda Digital de España. [Online]. www.agendadigital.gob.es
- [70] CALIOPE. [Online]. www.bsc.es/caliope/es
- [71] Red Ciudades Inteligentes. [Online]. www.redciudadesinteligentes.es
- [72] Canarina Software Ambiental. [Online]. www.canarina.com
- [73] Providence Engineering and Environmental Group LLC. [Online]. www.oris-solutions.com
- [74] Junta de Comunidades de Castilla - La Mancha. [Online]. www.jccm.e
- [75] Google Earth. [Online]. earth.google.com/web/
- [76] Environmental Software and Services. [Online]. ess.com.at
- [77] The University of Texas at Austin. [Online]. www.cs.utexas.edu
- [78] Barcelona Supercomputing Center. [Online]. www.bsc.es
- [79] Julio Hernández Rodríguez, ETSII, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid. [Online]. www2.uned.es/ing-fluidos